

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE ÈS SCIENCES DE
L'ACTIVITÉ PHYSIQUE

PAR
LOUIS DIONNE

ANALYSE DU DÉPLACEMENT D'UN CORPS
DANS UN PLAN À PARTIR
D'IMAGES VIDEO DIGITALISÉES

FÉVRIER 83

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

SACHEZ MES CHERS, MES BONS PARENTS
TOUTE MA RECONNAISSANCE

à Marie et Gaston

RESUME

Ce mémoire est une incursion dans une avenue encore peu explorée de l'analyse automatique en biomécanique. La fidélité et l'utilité d'un système automatique dédié à l'analyse cinématique sur micro-ordinateur sont évaluées. Les composantes-clefs du système sont: un APPLE II Plus, un digitaliseur vidéo peu coûteux et une caméra vidéo. Le principe de base est de comparer l'image matricielle de chacune des stases du mouvement à une image de référence mémorisée par l'ordinateur. Le mouvement d'un ballon sert à évaluer la fidélité du système: la trajectoire décrite à travers le système est comparée à celle prédite mathématiquement. La comparaison point pour point de ces deux trajectoires démontre une correspondance étroite (corrélations de 0.99972 en X et de 0.99511 en Y; RMS de 0.913 po. (2.31 cm) en X et 0.931 po. (2.36 cm) en Y). De plus, le paramètre de gravitation obtenu par ajustement des moindres carrés est de 32.74 pi./sec^2 (9.98 m/sec^2), une erreur relative de seulement 1.75%. Le même type de comparaisons est aussi réalisé en fonction d'un système visuo-manuel. De plus, le mouvement du centre de gravité d'un sauteur dans un saut sans élan est reconstitué fidèlement par le système, tout en se comparant fort bien à un système couramment employé, le GRADICON. Dans le présent contexte, nous nous en tenons à la détermination du centre de position et démontrons qu'il s'agit d'un instrument satisfaisant pour l'analyse cinématique.

REMERCIEMENTS

Quiconque a déjà réalisé un mémoire se souvient de la somme d'énergie investie dans un tel projet. Il se souvient aussi des dettes contractées envers ceux qui l'ont non seulement aidé mais stimulé dans un accomplissement encore meilleur d'un travail de recherche.

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance particulière au docteur Louis Laurencelle, professeur au Département des sciences de l'activité physique (DSAP), pour sa loyauté et sa disponibilité intégrale, ainsi qu'à monsieur Pierre Nonnon, professeur au CEGEP de Victoriaville, qui mit en terre la semence de la récolte d'aujourd'hui. Nous voulons souligner la collaboration du docteur Jacques Dessureault du DSAP, à la réalisation du document-source, ainsi que sa participation éclairante à la réalisation technique. Nous remercions aussi nos compagnons d'études, madame Elizabeth Bureau et monsieur Yves Proulx pour leur contribution appliquée et soignée, ainsi que madame Martine Lesieur athlète chevronnée, pour sa gracieuse disponibilité. Enfin, soulignons le support technique expert apporté par monsieur Claude Brouillette, technicien en électronique aussi au DSAP, ainsi que madame Manon Lebel à qui nous devons la présentation du document.

TABLE DES MATIERES

	Page
RESUME.....	I
REMERCIEMENTS.....	II
LISTE DES TABLEAUX.....	V
LISTE DES FIGURES.....	VI
CHAPITRE	
I. INTRODUCTION.....	1
Contexte.....	2
Aperçu des chapitres suivants.....	9
II. STRATEGIES ET TECHNIQUES DE CALCUL.....	12
La digitalisation.....	12
Rangement mémoire.....	15
L'image de référence.....	15
L'algorithme de comparaison.....	15
Fonction de pondération.....	16
Calcul du centroïde.....	17
III. DEMARCHES METHODOLOGIQUES ET STATISTIQUES.....	18
Création du document-source.....	18
Procédure.....	18
Déroulement des prises de vue.....	20
Obtention des séries.....	21
La méthode vidéo automatique.....	22
Appareillage.....	22
Séances de mesures.....	22
Les instruments de comparaison.....	24
La méthode vidéo manuelle.....	24
La méthode GRADICON.....	26
Fidélité intra-méthode.....	26
Résultats statistiques.....	28
Estimation mathématique.....	30
Le saut.....	33
Fidélité inter-méthodes.....	36
Le ballon.....	36
Le saut.....	41

CHAPITRE	Page
IV. CONCLUSION.....	42
REFERENCES.....	45
ANNEXES	
A: Les séries de coordonnées (ballon et saut).....	47
B: Estimation des paramètres pour les équations.....	65
C: Les histogrammes de distances cartésiennes.....	68
D: Comportement des erreurs de grilles.....	71
E: Lexique statistique.....	74

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
1. Relation entre le quotient des RMS et le coefficient PDE.....	29
2. Résumé des résultats statistiques pour le ballon.....	31
3. Résumé des résultats statistiques pour le saut.....	35
4. Coordonnées x et y du centroïde optique obtenues par le vidéo automatique (série 1, ballon).....	48
5. Coordonnées x et y du centroïde optique obtenues par le vidéo automatique (série 2, ballon).....	50
6. Coordonnées x et y du centroïde optique obtenues par le vidéo manuel.....	52
7. Coordonnées x et y obtenues par équations mathématiques.....	54
8. Coordonnées x et y du centroïde optique obtenues par le vidéo automatique (série 1, saut).....	56
9. Coordonnées x et y du centroïde optique obtenues par le vidéo automatique (série 2, saut).....	59
10. Coordonnées x et y du centre de gravité obtenues par le GRADICON.....	62
11. Distances cartésiennes moyennes causées par des erreurs de "x" unités de grille.....	73

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
1. Montage des appareils pour séances de mesure.....	23
2. Représentation graphique de la trajectoire du ballon selon les valeurs obtenues par le vidéo automatique et obtenues à l'aide des équations mathématiques.....	38
3. Histogramme des distances cartésiennes entre vidéo automatique et équations mathématiques.....	69
4. Histogramme des distances cartésiennes entre vidéo automatique et GRADICON.....	70
5. Représentation d'une grille 9 par 9.....	72

CHAPITRE I

INTRODUCTION

Ce mémoire vise à démontrer et évaluer une méthode d'analyse automatique du déplacement d'un corps dans un plan cartésien. Le déplacement étudié est focal, en ce sens qu'il correspond au déplacement du "foyer" d'un objet en projection bidimensionnelle; la méthode s'applique idéalement à un objet sphérique ou sphériquement symétrique. Nous analyserons deux exécutions différentes; l'une d'elles, représentant le déplacement d'un ballon noir sur fond blanc, servira de "preuve" pour la méthode proposée. La seconde exécution représente un saut en longueur sans élan; nous souhaitons par là apprécier les possibilités d'application de la méthode à l'analyse cinématique en biomécanique.

La méthode d'analyse automatique s'appuie sur l'utilisation d'un convertisseur analogique à numérique, ou digitaliseur, alimenté par un signal vidéo. Le principe de mesure consiste à transférer dans l'ordinateur l'image digitalisée d'une scène préalable au déplacement étudié. Cette image dite de référence, représentée par une matrice cartésienne de coefficients d'intensité lumineuse, constitue un arrière-plan, par exemple un mur devant lequel s'apprête à survenir l'exécutant. Puis, pour chaque phase du mouvement tel qu'enregistré, une image digitalisée est obtenue. Cette image est comparée à la matrice de référence, et par les différences de coefficients d'intensité aux points correspondants,

un ensemble de coordonnées se rapportant à la position actuelle de l'exécutant est extrait. L'ordinateur calcule enfin le centroïde de position, soit les moyennes en X et Y des coordonnées d'une image du mouvement.

D'autres caractéristiques globales peuvent être calculées, telles le centroïde de déplacement, qui désigne la moyenne des coordonnées qui ont varié depuis l'image antécédente, la surface de position, qui est le produit des écarts-types des coordonnées de position de l'image et représente l'étalement de l'image sur la surface de référence. Dans le présent contexte nous nous en tiendrons à la détermination du centroïde de position, et nous tenterons de montrer qu'il s'agit là d'un moyen fidèle et utile pour les fins visées.

Contexte

Pour étudier le mouvement humain ou décrire les déplacements dans l'espace, les chercheurs, particulièrement en biomécanique et en génie, ont développé des techniques quantitatives d'une grande diversité. Ces techniques se classent sommairement en trois catégories. Dans une première catégorie, l'acquisition des données de mouvement et une grande partie de l'analyse sont faites "manuellement"; par exemple, un opérateur humain identifie à l'œil sur une image de film, un point particulier d'un système cartésien. On regroupe, dans une seconde catégorie, les techniques plus automatiques, où l'acquisition et l'analyse des données se font avec un minimum d'intervention humaine. On y retrouve les techniques optico-électriques dans lesquelles le sujet-cible est garni d'émetteurs optiques et où des instruments d'électronique et d'informatique reconstituent les déplacements cartésiens à partir des rayonnements

émis. La troisième catégorie se compose des techniques "spéciales", d'application réduite; ainsi, l'utilisation de goniomètres ou d'accéléromètres fixés directement sur le sujet complète l'information relevant principalement d'une analyse cinématographique et/ou électromyographique.

Dans le cas présent, puisque nous suggérons un système automatique, nous nous en tiendrons à réviser et analyser les systèmes automatiques déjà existants. Une revue, fort complète d'ailleurs, des méthodes pré-automatiques est présentée par Jarret (1976). D'autres auteurs tels que Kasvand et Miller (1972), Kettelkamp, Johnson, Smidt, Chao et Walker (1970), Lamoreux (1971), Simon, Deutsch, Nuzzo, Mansour, Jackson et Rosenthal (1978), Sutherland et Hagy (1972), élaborent grandement sur des systèmes manuels de mesure.

L'utilisation de caméras de télévision couplées à un ordinateur s'avère un outil précieux pour l'obtention rapide et précise de données de position servant à l'étude d'un déplacement. Un système du genre surpasse la cinématographie conventionnelle du point de vue de la rapidité, mais comporte aussi certains désavantages inhérents à la structure même des appareils utilisés. Whittle (1982) spécifie que (a) les axes horizontal et vertical sont d'échelles différentes; (b) les erreurs de quantisation dans l'interface affectent la résolution globale; (c) l'équation de digitalisation entre l'image optique et l'image électronique n'est pas stable mais change avec le temps, probablement à cause d'un réchauffement des composantes optiques; (d) le balayage électronique n'est pas parfaitement linéaire; (e) l'effet de l'entrelacement des demi-images réduit la résolution verticale et (f) il peut advenir une distorsion due à la lentille.

Le même auteur souligne que des erreurs analogues peuvent aussi être présentes lors de l'utilisation de systèmes cinématographiques courants mais généralement en proportion moindre. La précision des résultats dépend de la qualité de la caméra, du temps alloué pour permettre la stabilisation de la température de la caméra et du rapport entre la distance d'observation et la longueur focale de la lentille.

Une fois ces différentes contraintes admises, il nous est permis de discuter plus en profondeur les différentes méthodes d'automatisation. Les systèmes automatiques de mesure du mouvement utilisent en majorité des capteurs optiques, soit une caméra vidéo ou un photorécepteur de rayons infra-rouges, lesquels sont émis par des diodes. Le capteur optique est relié à un ordinateur qui supervise le transport de signaux et analyse les impulsions électriques. Ces systèmes fonctionnent souvent en temps réel.

Winter, Greenlaw et Hobson (1972) ont développé un système utilisant une caméra vidéo pour "observer" les pastilles placées sur le sujet et un magnétoscope qui enregistre ces images. Une fois la séquence de mouvement enregistrée, le magnétoscope est branché à un ordinateur lequel analyse la séquence image par image selon les instructions de l'utilisateur. L'ordinateur dispose d'une fenêtre matricielle de 96 par 96 unités, fenêtre que l'utilisateur doit placer sur la portion appropriée de l'image. Cette procédure incite le caméraman à cadrer le mouvement le plus près possible des limites du champ de vision de la caméra; ce qui implique aussi un mouvement de la caméra. Moyennant cette complication, le système atteint une résolution raisonnable de 1 mm.

Cheng (1974) interface directement un système de télévision à un mini-ordinateur, lequel évalue par digitalisation la position cartésienne des pastilles que porte le sujet. La précision est relative à une résolution de $1/240$. Le système mémorise les coordonnées horizontale et verticale de la pastille rencontrée; pour éviter les erreurs d'identification de pastille ou un moyennage de coordonnées provenant de deux ou plusieurs pastilles il bloque l'acquisition d'autres positions (ou pastilles) sur la même ligne du balayage TV. Cette méthode de détection est limitative puisqu'il peut arriver que deux pastilles soient à la même hauteur dans une image donnée.

Jarret (1976) décrit un système reprenant les grandes lignes de celui décrit par Cheng mais avec une résolution augmentée à $1/300$ et l'acquisition possible de coordonnées de plusieurs pastilles sur une même ligne TV. Ce système est commercialisé par "Oxford Medical System" sous le nom de "VICON System"; il existe aussi en version tridimensionnelle.

Le système ENOCH, conçu par Gustafsson et Lanshammar (1977), commercialisé plus tard par "Selcom Selective Electronic" sous le nom de "SELSPOT System" (pour SElective SPOT recognition), et décrit dans sa version commerciale par Andriacchi, Hampton, Schultz et Galante (1979) et Woltring et Marsolais (1980), s'avère un des systèmes les plus sophistiqués à l'heure actuelle. Le système mesure la position ou les coordonnées de plusieurs points, à partir d'émetteurs à infrarouge que porte le sujet. D'une à plusieurs caméras optoélectriques détectent la position des diodes et transmettent les données à un

ordinateur pour un traitement en temps réel. La technique de base se résume à allumer et éteindre les diodes rotativement à un rythme donné. La lumière infra-rouge émise est captée par la surface détectrice de la caméra et est transformée en quatre signaux électriques qui identifient la position du signal incident sur cette surface. L'ordre séquentiel d'allumage de la diode, et le système de synchronisation déterminent conjointement le segment mesuré. Le fabricant stipule une résolution de 1/4000 pour des mouvements courts et une distance caméra-sujet d'environ 16 pieds (5 m). L'erreur de position serait de moins de 1/200.

Quelques points négatifs apparaissent à l'utilisation (Taylor, Mottier, Simmons, Cohen, Paniak, Corneli et Hankins, 1982). Notons d'abord l'obligation pour le sujet de porter des diodes avec leur alimentation, ainsi que le système de synchronisation par fil ou par télé-métrie. Taylor et coll. (1982) remarquent aussi des erreurs attribuables à des reflets reçus par la surface détectrice de la caméra. Un autre inconvénient majeur, dans certains cas, est le coût d'achat et d'entretien, soit un investissement initial d'environ 110,000\$ en équipement spécialisé. De plus, le rapport entre émission et détection optiques limite le répertoire des mouvements susceptibles d'être analysés.

Mitchelson (1975) présente un autre système optoélectrique, le CODA (pour Cartésian Optoelectric Dynamic Anthropometer), qui utilise un tableau de photodiodes couplé à un encodeur optique. Une photodiode du tableau reçoit la lumière directionnelle émise par la diode d'une des pastilles que porte le sujet pour en déterminer la position

bidimensionnelle. L'encodeur optique fournit la troisième dimension. La résolution du système est de $1/200$. On y rencontre essentiellement les mêmes désavantages que pour SELSPOT System, et une moindre résolution.

Une nouvelle version, CODA-3, discutée par Taylor et coll. (1982), utilise le même procédé en éliminant le port des diodes émettrices. On utilise alors des pastilles réflectrices de lumière. La résolution est augmentée à $1/4000$ horizontalement et $1/8000$ verticalement avec un rythme d'échantillonnage de 600 Hz par pastille, permettant une réception de 8 pastilles simultanément.

Un tout nouveau système, planifié pour les trois dimensions, est proposé par Taylor et coll. (1982). Le système utilise des pastilles réflectrices dont la luminosité est captée, pour l'instant, par une seule caméra digitale. La lumière infra-rouge émise par les LEDs, placés près de la caméra, est réfléchiée par les pastilles réflectrices et est captée par la caméra. Les positions sont transmises à un ordinateur PDP 11/70 par un interface spécial. Cet interface est en réalité un circuit détecteur/discriminateur qui transforme le signal vidéo en un signal binaire selon un seuil préalablement fixé et réajusté à chaque image. Un échantillonnage à 60 Hz permet l'utilisation de 10 pastilles. Une fois la position du centroïde de chaque pastille placée en mémoire, le système entame une procédure d'identification et de traçage des déplacements de chaque pastille. La différence de ce système par rapport aux autres tient justement à cette identification après coup, au lieu d'une identification issue de la

synchronisation continue des signaux émis. Le logiciel recherche deux images consécutives contenant le même nombre de pastilles et dénotant un déplacement minimum. A l'aide de ces deux références on extrapole la position probable des mêmes pastilles à l'image suivante, ce qui permet d'apparier les pastilles d'image en image et préserver ainsi leur identité.

Ce système escamote le port d'émetteurs et rend superflue la délicate synchronisation que les autres systèmes requièrent. Il permet une précision de l'ordre de $1/500$ (0.2%) avec une résolution de $1/2000$. Par contre, il implique toujours le port d'un nombre d'ailleurs réduit de pastilles, ainsi qu'un support électronique d'une grande complexité.

Le développement de la micro-informatique et surtout la disponibilité commerciale de digitaliseurs vidéo connectables sur micro-ordinateur ouvrent de nouvelles voies pour la cinématique, ou pour l'analyse graphique en général. Ainsi, nous apprenons qu'un chercheur de l'University of Southern California, Anne Beuter est à valider un système, le "Videomotion Analyser" qui comprend un APPLE II Plus, utilisant un DIGISECTOR (DS 65). Les détails du système sont non disponibles pour l'instant.

A ce stade, nous pouvons imaginer un système à deux caméras vidéo perpendiculaires, reliées à un appareil de digitalisation vidéo (X,Y,Z). Un tel système, moyennant le recours à des techniques plus ou moins complexes d'identification d'objets, remplirait toutes les fonctions descriptives que les systèmes comme CODA-3, SELSPOT et

autres remplissent aujourd'hui, sans souffrir des inconvénients que nous avons relevés pour ces derniers. Ce que nous proposons ici n'est qu'un premier pas en ce sens, notre objet étant de vérifier l'utilité et les caractéristiques opératoires d'une méthode d'analyse par digitalisation vidéo supportée par micro-informatique.

Aperçu des chapitres suivants

La répétition parfaite d'un geste, ou d'un mouvement quelconque, est chose impossible à garantir, a fortiori si l'on considère la durée, l'amplitude et la trajectoire du geste ou mouvement. Comme stratagème principal pour rendre applicables nos méthodes de démonstration et de preuve, nous avons opté pour la création d'un document cinématographique source, à partir duquel toutes les analyses subséquentes seront dérivées. Ce document cinématographique est composé d'une part du déplacement d'un ballon noir sur fond blanc dans une trajectoire naturelle (parabolique), et d'autre part d'une exécution d'un saut en longueur sans élan.

La démarche que nous énonçons plus bas en est une de validation, dans laquelle les stratégies de preuve s'appuient partiellement sur des comparaisons de la méthode proposée, dite méthode vidéo, soit avec elle-même, soit avec une variante de la méthode vidéo qu'on peut qualifier de vidéo-manuelle, une méthode d'estimation mathématique de la trajectoire, et un système d'analyse cinématographique conventionnel, le GRADICON.

Le chapitre II s'articule autour des techniques de calcul et des procédés employés dans la mise au point du système. On y définit

la "digitalisation" pour ensuite traiter, entre autres, de la conception et de l'optimisation d'un programme permettant le traitement d'une image du film en peu de temps. Une autre section du chapitre traite du rangement en mémoire de l'image de référence, image à laquelle toutes les images subséquentes sont comparées. On y définit l'algorithme de comparaison des images courantes à l'image de référence, qui permet de trouver les coordonnées des points pour lesquelles les intensités lumineuses diffèrent. Une dernière section décrit le calcul du centroïde à partir d'une pondération relative aux différences d'intensité lumineuse établies par l'algorithme de comparaison.

Le chapitre III décrit les étapes de la démonstration de la méthode vidéo et les démarches mathématiques et statistiques visant à évaluer les fidélités tant de la méthode étudiée que de la méthode vidéo-manuelle et du GRADICON. Ces fidélités sont évaluées en comparant entre elles deux séries de coordonnées tirées de chaque instrument de mesure (fidélités intra-méthode).

Pour valider davantage la méthode vidéo, nous comparons ensuite les méthodes l'une à l'autre, les deux séries de coordonnées provenant à chaque fois de deux méthodes différentes (fidélité inter-méthode).

Les moyens de comparaison employés sont d'une part les corrélations intra-méthode et inter-méthode, et d'autre part des mesures de rapprochement des séries, en particulier le RMS. Ces deux types d'analyses permettent d'estimer quantitativement le degré de

superposition des séries concernées. Ces analyses sont réalisées sur chacune des coordonnées cartésiennes, la coordonnée verticale et la coordonnée horizontale. Nous évaluons aussi les différences, point pour point, en considérant simultanément les deux axes vertical et horizontal.

Enfin pour conclure, dans un quatrième chapitre nous essaierons de formuler une appréciation globale de la méthode vidéo, de façon absolue et relativement aux autres méthodes disponibles.

CHAPITRE II

STRATEGIES ET TECHNIQUES DE CALCUL

Ce second chapitre décrit et justifie les différentes stratégies et techniques de calcul employées dans la mise au point de la méthode vidéo automatique. L'objectif de ces stratégies débordé la seule mise au point de techniques de calcul; il inclut une optimisation globale de la méthode en termes de vitesse d'exécution et d'espace-mémoire requis, l'usage de la micro-informatique et ses limitations rendant cette double optimisation nécessaire.

La digitalisation. Par digitalisation (ou "discrétisation"), on entend la transformation d'un signal continu en données numériques (ou "discrètes"), selon une échelle de conversion convenue. Dans la digitalisation vidéo, le signal provient d'un encodeur vidéo, la caméra, et arrive au digitaliseur de façon régulière au rythme d'une image à chaque soixantième de seconde (1/60). Chaque image est composée verticalement de 262.5 lignes; les lignes sont tour à tour produites par le canon cathodique au rythme d'une ligne à toutes les 63.7 microsecondes, ce temps comprenant le temps de production, 53 microsecondes, et le délai de synchronisation, 10.7 microsecondes.

Le digitaliseur¹ que nous utilisons prend 12 microsecondes pour évaluer et transformer, sur une échelle numérique, l'échantillon vidéo

1. Il s'agit d'un interface DIGISECTOR DS-65 mis en marché par MICRO WORKS et conçu pour APPLE II. Le procédé d'échantillonnage, sample and hold, retient et convertit l'échantillon en 12 microsecondes.

qu'il a d'abord extrait du signal TV. La définition du digitaliseur est de 256 par 256, c'est-à-dire, qu'il transforme le signal vidéo selon une grille de 256 points horizontaux par 256 points verticaux. La valeur transformée, elle-même définie sur 6 bits, varie de 0 à 63 et reflète l'intensité lumineuse relative du point (X,Y) considéré. Cette définition impose un maximum de 65,536 points d'intensité. En supposant une utilisation parfaite du digitaliseur, de même que des temps de positionnement X,Y et de mémorisation nuls, le temps minimum requis pour convertir une image est de l'ordre de 3/4 de seconde, comparativement à 1/60 de seconde, la durée réelle d'apparition d'une image vidéo. D'où l'impossibilité flagrante d'utiliser un tel appareil pour l'analyse d'images en temps réel.

Au lieu de la définition complète de 256 par 256 points , une autre plus modeste, de 128 par 128 points, par exemple pourrait suffire à conserver les caractéristiques assez fines de l'image. Harmon (1973) a démontré par exemple, qu'une résolution spatiale de 16 par 16 permet l'identification d'un visage même avec une résolution d'intensité de 3 bits. Grâce à cette grille de 128 par 128 points, le temps parfait tomberait à 1/5 de seconde. Cependant, au temps parfait, il faut ajouter le délai de positionnement et le temps de mémorisation dans l'ordinateur, temps qui ne sont pas négligeables.

Ces considérations étant faites, il faut étudier le procédé global, l'algorithme qui règlera la conversion d'une image vidéo en une grille, ou matrice, de 128 lignes par 128 colonnes. Une première approche que nous avons expérimentée, est une digitalisation horizontale

ligne après ligne, de l'image. Un "pointeur" est positionné sur le premier point de la première ligne; à ce moment le digitaliseur retient un échantillon du signal. Cet échantillon est ensuite converti et la valeur de l'intensité lumineuse est mémorisée dans un vecteur linéaire. Le "pointeur" est ensuite repositionné au deuxième point de la première ligne, le digitaliseur attend le retour du canon cathodique, c'est-à-dire une resynchronisation et il retient un nouvel échantillon. Cette approche est coûteuse en termes de temps d'exécution puisque un seul échantillon est converti à chaque synchronisation du canon cathodique, soit le temps de production d'une image qui est de $1/60$ de seconde. Pour la grille considérée, le temps de digitalisation d'une image s'élève à 128 par 128 par $1/60$ de seconde, soit $273 \frac{4}{60}$ secondes.

Une autre approche, celle-là plus efficace, consiste à exploiter la période inter-synchronisation en effectuant une digitalisation verticale, colonne par colonne. Si la grille d'échantillonnage utilisée est de 128 par 128, la période inter-synchronisation entre le premier point de la première ligne et le premier point de la ligne suivante, soit la troisième (puisque l'on échantillonne une ligne sur deux), est 127 microsecondes, soit l'équivalent de deux lignes. Soustrayant le temps de conversion de 12 microsecondes, le temps disponible pour recueillir puis traiter l'information reçue approche 115 microsecondes. Le traitement effectué n'étant ici qu'une mémorisation dans un vecteur linéaire, et le positionnement à la ligne suivante étant pour ainsi dire anticipé, cette durée s'avère suffisante. Le temps de digitalisation d'une image

devient ainsi de $2 \frac{3}{60}$ secondes, soit 128 colonnes par $\frac{1}{60}$ de seconde. C'est selon cette digitalisation verticale que l'algorithme principal de comparaison des images s'est élaboré.

Rangement mémoire

L'image de référence. Le principe même de la méthode est de comparer à une image de référence les différentes images représentant les stases du mouvement. L'image de référence doit être entièrement mémorisée et facilement disponible à la comparaison.

Pour constituer l'image de référence, le digitaliseur numérise chacun des échantillons selon une échelle de 0 à 63, l'intensité "0" correspondant à noir. L'espace-mémoire nécessaire au rangement d'une donnée serait donc d'au moins 6 bits. On peut ramener à une échelle de 0 à 15 chaque valeur produite par le digitaliseur, en la divisant par 4; grâce à cette échelle à 4 bits, le rangement en mémoire peut être optimisé en plaçant les valeurs de deux échantillons successifs dans chaque octet. L'espace-mémoire nécessaire au rangement de l'image de référence est ainsi de 8 kilooctets. Cette topographie de la mémoire permet la comparaison des images subséquentes d'une façon simple et rapide.

L'algorithme de comparaison. Le même type de digitalisation est employé pour les images "courantes" que pour l'image de référence. L'algorithme de comparaison traite l'un après l'autre chacun des 128 vecteurs-colonnes de l'image "courante". Il compare le premier vecteur de l'image "courante" au premier vecteur de l'image de référence en mémorisant les coordonnées dont les intensités lumineuses correspondantes

différent. Il passe ensuite le contrôle à l'algorithme de digitalisation pour compléter le vecteur "courant" suivant, lequel est ensuite comparé au vecteur correspondant de l'image de référence.

Fonction de pondération. Les signaux vidéo, transportant les caractéristiques d'une image, peuvent contenir des artefacts qui ont pour effet d'altérer la représentation réelle de l'image. L'image elle-même peut, à cause de l'éclairage ou de la forme même de l'objet ou du corps analysés, contenir des régions ombragées ou des secteurs à haut reflet. Ces altérations de l'image sont jusqu'à un certain point compensées par une fonction de pondération découlant de la différence en intensité des points de l'image courante et de l'image de référence.

La pondération en fonction des intensités permet entre autres de fixer arbitrairement un seuil à partir duquel la différence d'intensité sera considérée statistiquement réelle et satisfaisante. Le poids, à une valeur de différence donnée, agit comme multiplicateur des coordonnées correspondant à cette différence.

La valeur d'une différence peut ici varier de - 15 à + 15. La fonction de pondération s'étale donc sur 31 niveaux de poids, ce qui permet en principe d'accorder une importance relative distincte à chaque valeur de différence. Pour l'analyse de la trajectoire du ballon et celle du saut en longueur, nous avons donné aux 26 plus bas niveaux un poids nul, et aux niveaux suivants des poids respectifs de 1, 2, 4, 8, 16. L'effet recherché est l'obtention d'une découpe marquée entre le fond et l'objet. Les différences allant de - 15 à + 10 sont rejetées

ou non considérées, alors que les différences allant de + 11 à + 15 sont amplifiées par une croissance géométrique. Le résultat donne une atténuation des reflets autour de l'objet et une intensification des contours.

Calcul du centroïde. Par centroïde, nous entendons le centre multidimensionnel d'un objet défini par un contraste lumineux. Dans le cas d'un objet sphérique ou sphériquement symétrique, le centroïde correspond au foyer géométrique, soit le point de rencontre des rayons de la sphère.

Lors de la discrétisation de l'image courante, chacune des coordonnées correspondant à une différence a été pondérée (c'est-à-dire multipliée par un poids), puis intégrée à la somme des coordonnées précédentes. Une fois la discrétisation de l'image courante complétée, nous disposons des sommes pondérées des coordonnées X et Y de même que de la somme des poids. En divisant les deux premières sommes par la dernière, on obtient les moyennes pondérées en X et en Y: reportées sur un plan cartésien représentant l'image, ces moyennes constituent un estimé du centroïde de position, ou du centre de la tache formée par l'objet ou le corps analysé. La valeur de cet estimé par rapport au centroïde réel dépend bien entendu de l'exactitude du digitaliseur et de la fonction de pondération utilisée.

CHAPITRE III

DEMARCHES METHODOLOGIQUES ET STATISTIQUES

Ce troisième chapitre présente les démarches mathématiques et statistiques qui servent à évaluer à la fois la fidélité intra-méthode et la fidélité inter-méthode, ou validité. Ces démarches complètent une méthodologie qui va de la création d'un document-source, à l'application de trois systèmes d'analyse différents, le vidéo automatique, le vidéo manuel et le système GRADICON.

Création du document-source

Le document cinématographique, dénommé document-source, constitue le modèle dont toutes les analyses subséquentes sont dérivées. De ce fait, il importe que la brillance et la précision des contrastes donnent une copie vidéo de qualité, en particulier qu'elle se rapproche le plus possible d'un original enregistré sur magnétoscope. Soulignons que l'idée originale d'utilisation du vidéo ne tenait aucun compte d'une perte de précision due à la copie d'un document cinématographique étant donné que l'utilisation d'une telle copie est strictement liée à un contexte de preuve expérimentale.

Ce document représente le déplacement d'un ballon noir sur fond blanc ainsi que l'exécution d'un saut en longueur sans élan. Le tournage est réalisé en intérieur, dans un amphithéâtre.

Procédure. Une ligne est tracée sur le sol sur toute la longueur de la scène à environ 9 pieds (2.74 m) du champ arrière. Ce champ arrière est

constitué d'un écran blanc de type cinéma mais sans pigmentation au chrome ou à l'argent. La ligne tracée représente l'axe idéal de la trajectoire du ballon; elle est aussi le repère permettant au lanceur du ballon d'ajuster son geste de façon à maintenir l'axe de la trajectoire perpendiculaire à l'axe de la caméra.

L'éclairage est par la suite agencé en fonction de la trajectoire. Quatre lampes halogènes, de 600 watts chacune, sont placées derrière l'axe de la trajectoire. La direction du flot lumineux est ajustée afin de former un éclairage dense et uniforme de tout le champ arrière; par cela, on réduit au minimum les ombres projetées sur le fond lorsque le ballon passe devant les lampes qui l'éclairent. Ces lampes, au nombre de deux, et du même type que les précédentes, sont situées à trois pieds devant l'axe de la trajectoire. Les six lampes n'entrent pas dans le champ de vision de la caméra.

Le ballon, d'un diamètre de 8.66 pouces (22cm), pèse 14 onces (400 grammes). Il est peint en noir et a un fini mat.

La caméra, une LOCAM à vitesse variable et à obturateur rotatif, est montée d'une lentille de 25 mm de distance focale pour le cas du ballon et de 75 mm pour le cas du saut en longueur. Cette caméra est dotée d'un mécanisme de marquage du film. Le mécanisme, constitué d'un générateur d'impulsions à débit réglable, contrôle l'allumage d'une minuscule diode à allumage rapide, un LED, qui marque le film à la cadence de 100 impulsions par seconde. Pour la prise de vue du ballon, la caméra est placée de manière à ce que son axe soit perpendiculaire horizontalement

et verticalement à l'axe de la trajectoire du ballon. L'objectif est à une distance de 32.4 pieds (9.88 m) de la ligne tracée sur le sol, permettant un champ de vision de la caméra d'environ 13 pieds (3.96 m).¹ Pour le saut en longueur, l'objectif de la caméra est à une distance de 25.7 pieds (7.83 m) de l'action. Dans les deux cas le rythme d'obturation de la caméra est fixé à 100 images par seconde. Le rythme réel d'obturation calculé par les marques sur le film, produites par le générateur d'impulsions, donne un taux de 102.22 images par seconde pour le ballon et de 102.85 images par seconde pour le saut en longueur.

Déroulement des prises de vue. Le lanceur du ballon² est agenouillé à l'extrémité gauche de la trajectoire prévue et chevauche la ligne repère. Il demeure hors du champ de vision de la caméra. Son lancer est simple, et quelques essais de pratique suffisent à produire une trajectoire relativement invariable du ballon.

Au signal de l'expérimentateur³, la caméra est mise en action. Le lanceur compte jusqu'à trois pour laisser à la caméra le temps d'atteindre sa vitesse régulière, puis il lance le ballon dans l'axe prévu. Lorsque le ballon touche le sol, le caméraman stoppe la caméra. Deux

-
1. Des essais préliminaires ont déterminé que le ballon évoluait à une vitesse horizontale d'environ 10 mph (16 km/h). La trajectoire filmée est donc d'une durée légèrement inférieure à 1 seconde: 13 pieds (3.96 m) par 3600 secondes divisé par 52800 pieds (16 km) = .89 seconde. Le nombre d'images escompté est par conséquent de 80 à 100 images analysables.
 2. Monsieur Yves Proulx, étudiant gradué, Département des sciences de l'activité physique.
 3. Monsieur Jacques Dessurault, Ph.D., professeur au Département des sciences de l'activité physique.

assistants de l'expérimentateur sont placés en bout de trajectoire et jugent de l'exactitude du point de chute du ballon par rapport à la trajectoire idéale. Un écart latéral de plus de 8 pouces (20 cm) ou un écart axial de plus de 24 pouces (60 cm) suffisaient à rejeter l'essai. Le numéro de l'essai manqué était noté de façon à le repérer sur le film, parmi toute la série d'essais.

La procédure utilisée pour le tournage du saut en longueur¹ est celle normalement employée lors du filmage de gestes sportifs et se trouve très bien décrite dans un texte de Dessureault et Lafortune (1980).

Obtention des séries de données de position. Six séries contenant 80 données de position cartésienne du ballon sur sa trajectoire ont été retenues pour fins d'analyse. De ces séries, deux proviennent du système vidéo automatique, trois autres du système vidéo manuel et la dernière provient d'une estimation mathématique par équations de trajectoire fondée sur une des séries produites par le système vidéo automatique. Cinq autres séries contiennent les positions cartésiennes des différentes stases du saut en longueur. Deux séries de 130 positions cartésiennes proviennent, encore une fois, du système vidéo automatique et trois du système GRADICON. Des trois séries provenant du système GRADICON, deux servent à déterminer la fidélité intra-méthode. Elles sont construites de 65 positions cartésiennes seulement, échantillonnées à toutes les deux images. L'autre série, constituée de 130 positions cartésiennes, est destinée à la comparaison inter-méthodes.

1. Madame Martine Lesieur, athlète membre de l'équipe nationale de ski de 1978 à 1981.

La méthode vidéo automatique.

Appareillage. La méthode vidéo automatique utilise le matériel suivant: une caméra vidéo noir et blanc SONY AVC 3200 avec zoom de 20 à 80 mm; un projecteur LAFAYETTE 16 mm avec contrôleur d'images; un micro-ordinateur APPLE II Plus comprenant 48 kilo-octets de mémoire RAM; au moins un tourne-disque à disques souples; un digitaliseur vidéo noir et blanc de marque DIGISECTOR DS 65 de MICRO WORKS à grille de 256 par 256 et résolution de 6 bits; un moniteur TV; une imprimante; un interface permettant le contrôle de l'avance des images par l'ordinateur¹. Nulle modification n'est effectuée sur le matériel mentionné, sauf en ce qui concerne l'appareil DIGISECTOR dont les potentiomètres à trois quarts d'un tour, servant au réglage de la brillance et du niveau de contraste, ont été remplacés par des potentiomètres à 11 tours.

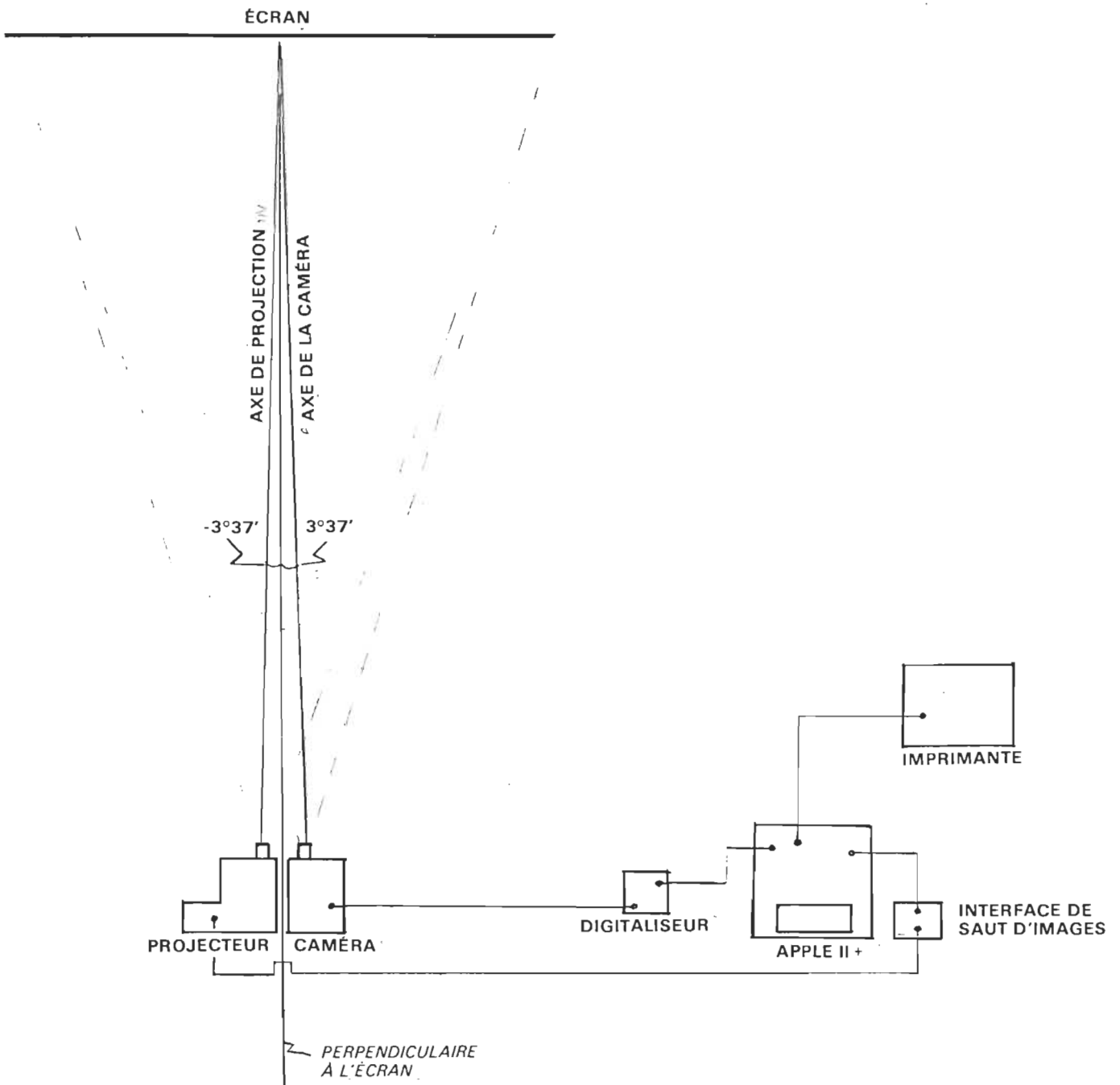
Séances de mesure.

Les séances de mesure se déroulent dans un environnement sombre afin de permettre une projection claire des images du film.

Le projecteur est placé à 4 pieds (1.22 m) d'un écran d'environ 12 (0.305 m) par 10 pouces (0.254 m) sur lequel est braquée la caméra vidéo. L'axe du projecteur et l'axe de la caméra vidéo forment des angles de $-3^{\circ}37'$ et $3^{\circ}37'$ respectivement dans le plan horizontal, par rapport à la perpendiculaire tirée du point central de l'écran. Dans le plan

1. Réalisé par monsieur Claude Brouillette, technicien en électronique au Département des sciences de l'activité physique.

Montage des appareils pour séances de mesures



vertical, l'axe des deux appareils se confond avec la perpendiculaire. Le zoom est réglé de façon à ce que l'écran soit juste inclus dans un champ visuel complet de la caméra, ceci afin de répartir l'action sur toute l'étendue de la grille du digitaliseur (voir Figure 1).

La phase suivante en est une de réglage de la brillance et du contraste pour le digitaliseur. Il faut en effet adapter l'échelle de sensibilité de l'appareil à l'étendue des intensités lumineuses transmises dans un contexte particulier.

Ensuite, l'image contenant le tableau de référence est projetée sur l'écran. Le programme est alors mis en route et l'ordinateur mémorise le tableau de référence sous la forme d'une matrice cartésienne. Dès sa mise en route, le programme contrôle toute l'analyse, et nulle intervention humaine n'est requise. L'ordinateur commande ainsi un saut d'image au projecteur et l'image présentée est à son tour discrétisée. A mesure qu'une nouvelle image est transformée en matrice cartésienne, elle est comparée à la matrice de référence, et la position cartésienne de son centroïde est calculée et imprimée¹.

Les procédures de prise de mesure sont les mêmes pour les deux types de déplacements (ballon, saut) étudiés. Les séries complètes de centroïde sont reproduites en Annexe C.

Les instruments de comparaison.

La méthode vidéo manuelle. La méthode dite "vidéo manuelle" consiste en un repérage visuo-manuel de la position du centroïde de

1. Dans le cas présent le temps de traitement s'est avéré être de 5 sec par image.

surface du ballon, pour chaque image filmée de la trajectoire. Plus précisément, la méthode consiste à projeter le film sur un écran sur lequel est braquée la caméra vidéo, dans un montage semblable à celui décrit pour la méthode vidéo automatique. L'image vidéo est retransmise sur un écran cathodique. Sur cet écran on peut, aussi, grâce au digitaliseur et à un logiciel particulier, déplacer à volonté un point lumineux au moyen de deux potentiomètres, l'un pour la verticale et l'autre pour l'horizontale. Il suffit à l'évaluateur de prendre un certain recul face à l'écran, de tourner les potentiomètres jusqu'à ce que le point lumineux lui paraisse correctement placé, par exemple au centre de la surface du ballon. A ce moment la pression d'un bouton-poussoir commande l'impression des coordonnées actuelles du point lumineux. La procédure se répète pour chacune des images de la trajectoire.

La méthode vidéo manuelle a comme avantage certain d'exploiter la même grille et la même échelle que la méthode vidéo automatique. Elle permet ainsi des comparaisons directes ne nécessitant pas de conversion ni de transposition et n'est limitée dans sa précision que par la dimension des unités de la grille. De plus, dans sa forme globale, elle est un jumeau, plus modeste, du système visuo-manuel GRADICON.

Deux séries de 80 positions cartésiennes ont été obtenues successivement, selon les mêmes procédures, en utilisant les mêmes images de départ. Ces séries sont destinées à la détermination de la fidélité intra-méthode. Une troisième série de 80 positions cartésiennes a été produite selon des procédures similaires pour des fins de

comparaison inter-méthodes. L'image de départ correspond à l'image de départ choisie pour l'estimation par le système vidéo automatique.

La méthode GRADICON. Un des systèmes les plus couramment employés pour extraire les données positionnelles d'un film est le système GRADICON, pour GRAPHical to DIGital CONverter. Le système se compose de trois unités reliées: un panneau inclinable de 3 pieds (0.915 m) par 4 pieds (1.22 m) contenant un curseur intégré, une console de conversion analogique-à-numérique ainsi qu'une perforatrice IBM actionnée automatiquement par la console.

Les procédures de prise de mesure sont celles utilisées lors de l'étude biomécanique du mouvement et sont documentées, entre autres dans Dessureault et Lafortune (1980). Les données extraites par le GRADICON sont ensuite traitées par le programme Fortran "Filmdat" présentée par Bates, Barry (1974). Seuls les résultats en terme de positions du centre de gravité total sont retenus pour fins d'analyse.

Fidélité intra-méthode.

Les méthodes de comparaison employées sont le coefficient de corrélation (r de Pearson) et le coefficient d'aliénation (k), pour deux séries de positions cartésiennes correspondant à la même séquence filmée, et obtenues toutes deux du même instrument. Nous utiliserons aussi une mesure de superposition des séries, RMS, définie par:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_i (x_{1i} - x_{2i} - C)^2}{n}}$$

$$\text{où } C = \bar{x}_1 - \bar{x}_2$$

la constance C ramenant les deux séries comparées à une origine commune. En fait, cette valeur RMS est obtenue au moyen d'une formule légèrement modifiée¹:

$$RMS = \sqrt{(1 - r_{1,2}) * (S_1^2 + S_2^2)}$$

Les valeurs pour établir les statistiques comparatives de RMS sont basées sur le quotient des RMS vidéo automatique par rapport aux RMS des autres séries. Cette valeur, le pourcentage de différence d'erreurs (PDE), est exprimée selon une échelle allant de - 100 à 100, au moyen de la transformation suivante:

$$\text{soit } Q = \frac{RMS_{\text{vidéo automatique}}}{RMS_{\text{autre}}}$$

$$PDE = 100 (1 - Q) \quad \text{si } Q \leq 1$$

$$PDE = -100 (1 - Q^{-1}) \quad \text{si } Q > 1$$

1. Strictement, on aurait:

$$RMS^2 = S_1^2 + S_2^2 + 2rS_1S_2$$

Toutefois, en stipulant l'égalité des variances, la formule modifiée apparaît comme suit:

$$\begin{aligned} RMS^2 &= 2S^2 (1 - r) \\ &= 2 \frac{(S_1^2 + S_2^2)}{2} * (1 - r) \\ &= (1 - r_{1,2}) * (S_1^2 + S_2^2) \end{aligned}$$

la valeur $PDE = 0$ signifiant l'égalité des RMS et la valeur $PDE = -50$ indiquant une différence d'erreurs de 50% désavantageant le vidéo automatique. On peut voir au tableau 1 la correspondance régulière entre le quotient des RMS (Q) et l'indice PDE. De plus, nous considérons l'erreur relative (ER), soit la proportion du RMS par rapport à l'amplitude du déplacement, celle-ci estimée dans chacune des séries. Cette proportion est définie par:

$$ER = \frac{100 * RMS_{1,2}}{\sqrt{ampl_1 * ampl_2}}$$

Notons qu'il n'y a pas de critères pour juger le RMS intra-méthode, et qu'en fixer un serait arbitraire. C'est pourquoi nous utilisons des comparaisons de RMS intra-méthode de façon à juger si l'erreur rattachée au vidéo automatique est supérieure ou non à celle des autres méthodes. Aucune limite n'est fixée mathématiquement pour partager l'acceptable de l'inacceptable. La règle ici en est une de logique et de bon sens. Par exemple, une valeur PDE positive favorise le vidéo automatique tandis qu'une valeur ER qui tend vers zéro est souhaitable.

Résultats statistiques.

Le ballon. Les séries provenant du vidéo automatique produisent un coefficient d'aliénation $(k)^1$ de 0.00969 en abscisse ($r = 0.99995$)

1. Dans le cas présent nous avons choisi de présenter k au lieu de r , étant donné la difficulté d'interpréter des valeurs r très élevées. Rappelons que $r^2 + k^2 = 1$ et qu'une valeur k petite est ici désirable.

Tableau 1

Relation entre le quotient des RMS et le coefficient PDE

Quotient des RMS (Q)	PDE
0	100
0.5	50
0.75	25
1	0
2	- 50
4	- 75
10	- 90
20	- 95

et de 0.08376 en ordonnée ($r = 0.99649$). La mesure de RMS est de 0.37612 po. (0.96 cm) en abscisse et de 0.79464 po. (2.02 cm) en ordonnée.

Par la méthode vidéo manuelle d'autre part, on obtient un k de 0.03540 pour X ($r = 0.99937$), et de 0.04630 pour Y ($r = 0.99893$). Quant au RMS on obtient 1.44546 po. (3.67 cm) et 0.47370 po. (1.20 cm) pour X et Y respectivement.

L'erreur relative (ER) montre pour le vidéo automatique une valeur de 0.3% en abscisse comparativement à 1.1% pour le vidéo manuel. La même statistique en ordonnée se situe à 2.6% pour le vidéo automatique et à 1.6% pour le vidéo manuel. Les fluctuations sont donc minimes et suffisamment comparables pour les deux méthodes. Le tableau 2 présente l'ensemble de ces résultats pour le ballon.

La statistique PDE, qui reflète la différence des RMS, atteint + 97.3% en abscisse et - 40.4% en ordonnée.

Estimation mathématique de la trajectoire du ballon. Une seconde forme d'évaluation de la fidélité nous est fournie par le biais d'une estimation mathématique. En effet on peut, à partir de quelques paramètres, estimer la trajectoire (parabolique) d'un projectile. Ces paramètres sont, en l'occurrence: la vitesse initiale (V_0), l'angle de lancement (θ), la gravité terrestre (g), l'origine à l'ordonnée (Y_0) et l'origine à l'abscisse (X_0). Ils sont implicitement présents dans les séries de coordonnées que nous étudions, à un ajustement d'échelles près.

Les paramètres sont extraits des séries vidéo en estimant les

Tableau 2

Résumé des résultats statistiques pour le ballon

Statistique	Vidéo automatique	Vidéo manuel
K_{XX}	0.00969	0.03549
K_{YY}	0.08376	0.04630
r_{XX}	0.99995	0.99937
r_{YY}	0.99649	0.99893
RMS_X (po.)	0.37612	1.44546
RMS_Y (po.)	0.79464	0.47370
ER_X (%)	0.3	1.1
ER_Y (%)	2.6	1.6

coefficients de deux équations de régression, l'une du premier degré (pour les X), l'autre du second degré (pour les Y), selon un critère des moindres carrés (voir par exemple Guilford, 1965). Les équations de trajectoire de base suivent les modèles de régression, et sont:

$$X_t = X_O + V_O \cos \theta t$$

$$Y_t = Y_O + V_O \sin \theta t + \frac{1}{2} g t^2$$

Les estimés de régression, en notation ordinaire selon les variables X, Y, et t, sont:

$$(X_O) = \bar{X} - (V_O \cos \theta) \bar{t}$$

$$(V_O \cos \theta) = \frac{S_X}{S_t} r_{Xt}$$

pour la première équation, et pour la seconde:

$$(Y_O) = \bar{Y} - (V_O \sin \theta) \bar{t} - (\frac{1}{2} g) \bar{t}^2$$

$$(Y_O \sin \theta) = \frac{S_Y}{S_t} * \frac{r_Y - r_{Yt}^2 r_{tt}^2}{1 - r_{tt}^2}$$

$$(\frac{1}{2} g) = \frac{S_Y}{S_t} * \frac{r_{Yt}^2 - r_{Yt} r_{tt}^2}{1 - r_{tt}^2}$$

Quant aux paramètres physiques θ et V_O , on les obtient par:

$$(\theta) = \tan^{-1} \frac{(V_O \sin \theta)}{(V_O \cos \theta)}$$

$$(V_O) = \frac{(V_O \sin \theta)}{\sin \theta} = \frac{(V_O \cos \theta)}{\cos \theta}$$

(Voir aussi Annexe B)

Chaque série provenant du vidéo automatique produit les paramètres nécessaires à l'estimation d'une trajectoire. En comparant chacun des paramètres tirés de la première série à son correspondant tiré de la deuxième série, nous obtenons une statistique de fidélité plus profonde, laquelle est exprimée sous forme d'erreur relative. Cette statistique est basée sur la moyenne géométrique des paramètres en cause. Par exemple l'erreur relative entre A et B est calculée par:

$$ER = \frac{|A - B|}{\sqrt{A * B}} * 100$$

Notons d'abord que les paramètres X_0 et Y_0 sont de moindre importance puisqu'ils ne servent qu'à situer le point de départ de la trajectoire. Ils ne sont donc pas pris en considération. La vitesse initiale (V_0) calculée selon la série 1 est de 23.727 pi./sec (environ 26 Km/h) comparativement à 24.037 pi./sec (environ 26.4 Km/h) pour la série 2. L'erreur relative est donc de 1.3%. L'angle résultant de la série 1 est de 43.01° comparativement à 43.26° pour la série 2. L'erreur relative s'avère de 0.6%. La valeur de gravité terrestre donnée par la série 1 se situe à 32.52 pi./sec² (9.912 m/s²) tandis que la série 2 produit une valeur de 32.95 pi./sec² (10.04 m/s²). L'erreur relative se situe à 1.3%.

Le saut. Dans un contexte de comparaison de deux instruments ayant des grilles de digitalisation différentes, il est risqué d'opérer sur les données une série de transformations mathématiques destinées à les réduire à une même échelle. Nous nous en tiendrons donc à une transformation en unités réelles de l'objet matériel

(en pouces), plutôt que de son image projetée par exemple. Les résultats comparatifs sont pour leur part exprimés en termes de proportion des RMS en rapport à l'amplitude du déplacement et en pourcentage de différence d'erreurs (PDE), calculés sur ces RMS.

Les séries provenant du vidéo automatique montrent des coefficients d'aliénation (k) de 0.03737 ($r = 0.99930$) en X et de 0.14353 ($r = 0.98965$) en Y. Les mesures de RMS sont de 0.88719 po. (2.25 cm) et de 1.19039 po. (3.02 cm) pour les X et les Y, respectivement.

Le système GRADICON produit des séries dont les k sont de 0.01995 ($r = 0.99980$) pour l'abscisse, et de 0.21021 ($r = 0.97766$) pour l'ordonnée. Les RMS correspondants sont de 0.49189 po. (1.25 cm) et de 1.68561 po. (4.28 cm), toujours pour le GRADICON.

L'erreur relative (ER) se situe pour le vidéo automatique à 1.2% en abscisse comparativement à 0.7% pour le système GRADICON. En ordonnée, la même statistique atteint 2.3% pour le vidéo automatique et 6.4% pour le GRADICON. Les fluctuations sont encore une fois minimales et comparables pour les deux systèmes avec un avantage léger pour le vidéo automatique. Le tableau 3 résume les résultats. Il est remarquable que le GRADICON présente de tels résultats si l'on considère la grille matricielle dont ce système dispose. Notre système, on l'a vu, exploite une grille de digitilisation de 128 par 128 points alors que celle du GRADICON est de l'ordre du 0.01 po. (.03 cm) soit environ 3600 par 3600 pour une surface de projection de 3 par 3 pieds (.914 m). Comme l'analyse au GRADICON se fait avec le même projecteur que pour le vidéo automatique et qu'en plus l'analyse est pondérée en fonction de la masse des différents segments,

Tableau 3.

Résumé des résultats statistique pour le saut

Statistique	Vidéo automatique	GRADICON
k_{XX}	0.03737	0.01995
k_{YY}	0.14353	0.21021
r_{XX}	0.99930	0.99980
r_{YY}	0.88719	0.49189
RMS_X (po.)	0.88719	0.49189
RMS_Y (po.)	1.19039	1.68561
ER_X (%)	1.2	0.7
ER_Y (%)	2.3	6.4

le manque relatif de précision peut être attribué au procédé de repérage visuo-manuel des points, qui caractérise ce système.

La statistique PDE atteint -44.5% en abscisse et 29.4% en ordonnée.

Fidélité inter-méthodes.

La fidélité inter-méthodes, dans le contexte actuel, voisine le concept de validité concomitante (Cronbach, 1971). La démarche de validation du système vidéo automatique se base surtout sur des statistiques de fidélité inter-méthodes. Il s'agit ici de comparer une série de données de positions cartésiennes provenant du système vidéo automatique à une série du même genre produite par chacun des autres instruments de mesure. Comme pour la fidélité intra-méthode, les statistiques s'appuient sur des corrélations et des mesures de RMS. Pour être acceptable, un coefficient de corrélation inter-méthodes devra se situer à 0.80 ou plus de la racine carrée du produit des fidélités intra-méthodes respectives, quantité qui représente le plafond théorique de ce coefficient (Stanley, 1971).

Le ballon. Le coefficient d'aliénation pour les positions en abscisse obtenues par le vidéo automatique et les équations de trajectoire se situe à 0.02366 ($r = 0.99972$). Les deux mêmes séries considérées en ordonnée produisent un k de 0.09877 ($r = 0.99511$). La valeur de RMS est égale à 0.91302 po. (2.32 cm) pour l'abscisse et 0.93076 po. (2.36 cm) en ordonnée.

Le paramètre de gravité terrestre extrait de la série provenant du vidéo automatique est ici un indice révélateur de la précision des données fournies. Ce paramètre a comme valeur moyenne

32.74 pi./sec² (9.98 m/sec²), ce qui se situe très près de la valeur de la constante physique évaluée à 32.1765 pi./sec² (9.81 m/sec²)¹, l'erreur relative étant de 1.75%. Une explication plus visuelle nous permet d'évaluer mieux la précision des données recueillies par le vidéo automatique. Sur la figure 2, la courbe en pointillés représente la trajectoire observée et reproduite à partir des coordonnées tirées du système vidéo automatique. La courbe en noir représente la trajectoire mathématique du ballon à partir des paramètres estimés préalablement. Notons que le paramètre "g" inclus dans l'équation du second degré n'est pas une valeur estimée mais plutôt la valeur 32.1765 pi./sec² (9.8073 m/sec²) observée au Centre d'essais balistiques de Nicolet. De ce fait, les deux seuls paramètres importants pour la reconstitution mathématique de la trajectoire sont la vitesse initiale et l'angle de lancement; ce qui probablement compose une image plus juste de la trajectoire idéale ou réelle du ballon.

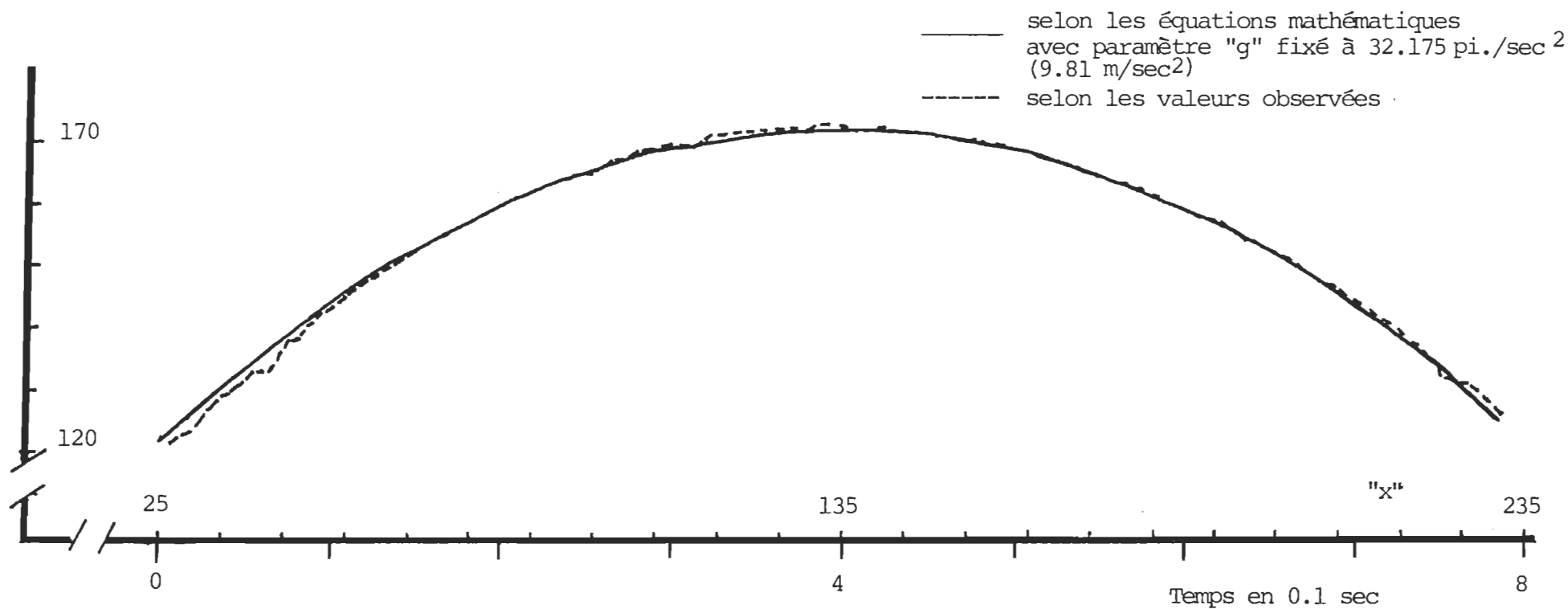
Le RMS ainsi obtenu se situe en X à 1.2494 po. (3.17 cm) et en Y à 0.4585 po. (1.16 cm).

La même série provenant du vidéo automatique, comparée cette fois à une série provenant du vidéo manuel, produit un k de 0.02049 (r = 0.99979) en abscisse et de 0.10947 (r = 0.99399) en ordonnée. Le RMS croisé se situe à 0.78730 po. (1.20 cm) en abscisse et à

1. D'après le Centre d'essais balistiques de la DÉFENSE NATIONALE CANADIENNE DE NICOLET, Québec, Monsieur J.L. Gagnon, responsable des essais.

Figure 2

Représentation graphique de la trajectoire du ballon selon les valeurs obtenues par le vidéo automatique (observées) et obtenues à l'aide des équations mathématiques.



1.02658 po. (2.61 cm) en ordonnée.

Le critère a priori de 0.80 quant au coefficient de corrélation en abscisse est ici amplement respecté puisqu'il s'appuie au plafond théorique (p.t. = 0.99966) avec une valeur comparative de 1.0001. Le coefficient de corrélation pour les données de positions cartésiennes en ordonnée se situe à 0.996 du plafond théorique (p.t. = 0.99771) donné par la racine carrée du produit des corrélations intra-méthode.

D'autres types de comparaisons sont utiles à la validation du système vidéo automatique. Par exemple, la proportion de l'erreur (RMS) en fonction du diamètre du ballon [le diamètre de 8.6614 po. (22 cm) étant une mesure empirique réelle] est de 4% en abscisse et de 9% en ordonnée. Cette même mesure d'erreur (RMS), comparée à l'amplitude de la trajectoire, montre qu'elle correspond à moins de 0.3% de la trajectoire en abscisse et à 2.6% en ordonnée. Ces valeurs sont minimales si l'on considère d'une part, les dimensions réduites de l'objet et l'instabilité verticale du projecteur Lafayette employé pour la projection du film. Cette instabilité fut maintes fois remarquée, et consiste apparemment en un "encadrement" plus ou moins lâche de l'image, ce qui peut en partie expliquer les pourcentages d'erreur plus élevés en ordonnée. Une seconde explication tient à l'étalement différent de la trajectoire en X et en Y, puisque l'amplitude horizontale de 11.06 pi. (3.37 m) correspond à 4 fois l'amplitude verticale qui est de 2.59 pi. (.79 m). L'erreur est de ce fait mieux "absorbée" en X qu'en Y.

Un autre indicateur de précision est la fluctuation en termes de durée de la trajectoire du ballon. La durée calculée de façon empirique, à partir du nombre d'images impliquées dans l'amplitude et le rythme d'obturation de la caméra, équivaut à 0.7912 sec comparative-ment à 0.7954 sec évaluée selon les équations de trajectoire tirées des coordonnées de position données par le système vidéo automatique. La différence représente 0.5% de la mesure empirique, laquelle reflète la supposée régularité du rythme d'obturation.

Jusqu'à maintenant, toutes les statistiques réalisées sur les données obtenues par les différents systèmes employés ont considéré les axes comme indépendants. Une seconde forme d'analyse consiste à évaluer les fluctuations bidimensionnelles, en utilisant les distances cartésiennes définies comme celles séparant deux points dans un plan.

L'analyse porte sur les distances séparant les données de positions cartésiennes tirées du vidéo automatique et celles obtenues par estimation mathématique, qui constitue en somme la trajectoire réelle du ballon. L'examen de ces résultats nous montre que la distance cartésienne moyenne séparant les deux séries de données est de 0.761 po. (1.93 cm) avec un écart-type de 0.440 po. (1.12 cm), une donnée aberrante étant exclue. L'histogramme des distances montre que 60.49% des fluctuations sont de l'ordre de 0.749 po. (1.90 cm) ou moins, ce qui correspond à une erreur d'une unité de grille ou moins, 29.63% des données se situent entre 0.749 po. (1.90 cm) soit d'une à deux unités de grille, 7.41% des données se situent entre

1.443 po. (3.67 cm) et 2.149 po. (5.46 cm), soit de deux à trois unités de grille, et 2.47% enfin dépassent 2.149 po. (5.46 cm) (voir annexe C).

En considérant la moyenne des distances cartésiennes en fonction du diamètre du ballon, l'erreur correspond à environ 9% du diamètre du ballon. Les fluctuations internes du vidéo automatique par rapport au diamètre du ballon étant de 9.17% en ordonnée et de 4.34% en abscisse correspondent à environ 10.15% du diamètre du ballon si l'on considère la "distance (X, y)" moyenne. La moyenne des distances cartésiennes de 9% du diamètre du ballon, reflète donc en grande partie des fluctuations verticales. Si tel est le cas, l'instabilité du projecteur peut en partie expliquer la teneur de ces résultats.

Le saut. Le coefficient d'aliénation (k) pour les positions en abscisse, donné par le vidéo automatique en fonction du système GRADICON se situe à 0.05299 ($r = 0.99860$). Les deux mêmes séries considérées en ordonnée montrent un k égal à 0.14758 ($r = 0.98905$). La valeur de RMS se situe à 2.01579 po. (5.12 cm) en abscisse et à 1.80598 po. (4.59 cm) en ordonnée.

Le critère a priori concernant les coefficients de corrélation est amplement respecté puisque les deux coefficients, en abscisse et en ordonnée, s'appuient au plafond théorique (p.t. = 0.99955 en X et 0.98364 en Y) avec des rapports respectifs de 0.999 et de 1.006.

CHAPITRE IV

CONCLUSION

Le système proposé s'avère efficace dans son ensemble. Dans le cas du ballon, le système vidéo automatique nous procure des coordonnées de position du centre d'optique épousant étroitement les coordonnées d'une trajectoire idéale. De plus, les différents paramètres physiques sous-tendant la trajectoire et estimés à partir des données de positions sont sans contredit moulés à la réalité.

Dans le cas du saut en longueur sans élan, la comparaison des résultats provenant du système GRADICON à ceux du système vidéo automatique paraît très satisfaisante, nonobstant les différences à la base même de cette comparaison. Le logiciel FIMLDAT, qui traite les données du GRADICON, procure les coordonnées pondérées du centre de gravité corporel en fonction du poids de chacun des segments, alors que le système vidéo automatique produit directement les coordonnées du centre optique seul.

Comme nous pouvons le constater, la qualité des résultats statistiques démontre qu'au niveau exploratoire, la méthode proposée s'inscrit dans un nouvel ordre de développement fiable et prometteur. Il n'est pas question pourtant de remplacer les méthodes d'analyse segmentaire: le système GRADICON, ou encore le système vidéo manuel dont nous avons fait état ici, sont encore des outils indispensables.

Le développement d'une analyse segmentaire automatique, inspirée

de notre méthode, suppose l'incorporation de principes et d'algorithmes reliés à la reconnaissance des formes. Pour la biomécanique en particulier, cette solution paraît vraisemblablement accessible. En effet, l'objet analysé, que ce soit un bras, une main ou un autre segment, est connu à l'avance et sa "forme idéale" (template) peut être disponible à l'ordinateur. Dans ces conditions, des techniques comme le "Template Matching", où l'on tente de maximiser la corrélation point pour point d'un segment idéal avec chaque partie d'une image courante, peuvent s'appliquer que ce soit dans un plan ou dans l'espace (Nevatia et Binford, 1977). Le système devrait aussi tenir compte des zones cachées ainsi que des modifications de forme dues à des rotations des segments ou à des angles de vue différents.

D'une part, comme nous l'avons souligné d'emblée, l'utilisation de la micro-informatique nous impose de sérieuses restrictions du point de vue de la vitesse d'exécution et de l'espace-mémoire disponible. Pour l'avenir rapproché du moins il nous faut donc oublier le traitement en temps réel, surtout si l'on s'oriente vers la reconnaissance des formes, fût-elle des plus sommaire.

D'un autre côté, la résolution matricielle des digitaliseurs actuels pourrait devenir un handicap pour l'étude des gestes fins. Il semble ressortir de la littérature qu'une résolution inférieure à 1 partie par 500 empêche toute la précision souhaitée. Dans l'annexe D, traitant de la grille de digitalisation, nous soulignons particulièrement l'effet, en termes d'imprécision en distance, causé par une

erreur d'une ou plusieurs unités de grille. Plus fine sera la grille, moindre sera l'imprécision en distance pour une erreur d'unité de grille donnée.

Le système proposé s'insère dans un domaine particulier de l'informatique. Il débouche sur une avenue relativement inexplorée du point de vue de son utilisation en biomécanique, au moment où les chercheurs semblent s'orienter vers une utilisation restreinte de logiciel, assortie d'un usage peut-être immodéré d'équipements électroniques sophistiqués.

Le système vidéo automatique, tel que décrit, est simple d'utilisation. Il comporte un minimum de pièces d'équipement, lesquelles se trouvent à bon marché. De plus, aucune intrusion vestimentaire, optico-électronique ou télémétrique, ne vient gêner le sujet dans l'accomplissement du geste étudié.

Il est clair que la qualité de l'instrumentation demeure la condition absolue de résultats valables.

REFERENCES

- Andriacchi, T.P., Hampton, S.J., Schultz, A.B., and Galante, J.O., Three-dimensional coordinate data processing in human motion analysis. Journal of Biomechanical Engineering, 1979, 101, 279-283.
- Cavanagh, P.R., Recent advances in instrumentation and methodology of biomechanical studies. Biomechanics VB., Baltimore: University Park Press, 1975, 399-411.
- Cheng, I., Computer television analysis of biped locomotion Ph.D. dissertation, Ohio State University, Columbus, Ohio, 1974.
- Cronbach, L.J., Test validation, in Educational Measurement second edition, Thorndike, R.L., Washington, 1971, 443-507.
- Dessureault, J., Lafortune, M., Biomechanical features of two styles of high-jumping. Morecki et Fidelus: Biomechanics VII., Baltimore: University Park Press, 1980.
- Guilford, J.P., Psychometric methods, McGraw-Hill Book Company, New-York, 1954, chap. 14.
- Gustafsson et Lanshammar, H., ENOCH-An integrated system for measurement and analysis of human gait. Uppsala: Institute of technology, 1977.
- Harmon, L.D., The Recognition of Faces, Scientific American, 1973, 229, 5, 70-82.
- Jarrett, M.O., A television computer system for human locomotion analysis, Ph.D. dissertation, University of Strathelyde, Glasgow, Scotland., 1976.
- Kasvand, T. and Milner, M., Pattern recognition applied to measurement of human limb positions during movement, Journal of Cybernetics, 1972, 66-78.
- Kettelkamp, O.B., Johnson, R.J., Smidt, G.L., Chao, E.Y.S., and Walker, M., An electrogoniometric study of knee motion in normal gait, Journal of Bone and Joint Surgery, 1970, 52, 225-290.
- Lamoreux, L.W., Kinematic measurements in the study of human walking, Bulletin of Prosthetics Research Spring, 10-15, 1971.

- Mitchelson, D.L., Recording of movement without photography, Techniques for Analysis of Human Movement, Lepus Books, London, 1975, 59-65.
- Nevatia, R., Binford, T.O., Description and recognition of curved objects, Artificial Intelligence, 1977, 8, 77-98.
- Plagenhoef, S., Patterns of Human Motion: A Cinematographical Analysis, Prentice Hall inc., New Jersey, 1971
- Radhakrishna, C., Advanced Statistical Method in Biometric Research, Hafner Press, New-York, 1974, chap. 3 et 6.
- Simon, S.R., Deutsch, S.D., Nuzzo, R.M., Mansour, J.M., Jackson, L.F. et Rosenthal, R.K., Genu recurvatum in spastic cerebral paralysis, Journal of Bone and Joint Surgery, 1972, 62a, 336-353.
- Sokal, R.R., Rohlf, J.F., Biometry, W.H., Freeman and company, San Francisco, 1969, chap. 14 et 15.
- Stanley, J.C., Reliability, in Educational Measurement second edition, Thorndike, R.L., Washington, 1971, 356-442.
- Sutherland, D.H., Hagy, J.L., Measurement of gait movement from motion-picture film, Journal of Bone and Joint Surgery, 1972, 54a, 787-797
- Taylor, K.D., Mottier, F.M., Simmons, D.W., Cohen, W., Paniak, R.J., Corneli, D.P. and Hanks, G.B., Journal of Biomechanics, 1982, 15, 7, 505-516.
- Whittle, M.W., Calibration and performance of a 3-dimensional television system for kinematic analysis, Journal of Biomechanics, 1982 15, 3, 185-196.
- Winter, D.A., Greenlaw, R.K., Hobson, D.S., Television-computer analysis of kinematics of human gait. Computers and Biomedical Research, 1972, 5, 498-504.
- Woltring, H.J. and Marsolais, E.B., optoelectric (selspot) gait measurement in two-and three-dimensional space - a preliminary report, Bulletin of Prosthetics Research, 1980, 17, 46-52.
- The SELPOT System (A), Technical Manuel, Partille (Suède): Selective Electronic Company.

ANNEXE A

LES SERIES DE COORDONNEES (LE BALLON ET LE SAUT)

Tableau 4

Coordonnées x et y du centroïde optique obtenues par le vidéo automatique
lors de l'analyse de la trajectoire du ballon (série 1)

Images	Coordonnées "x"	Coordonnées "y"	Images	Coordonnées "x"	Coordonnées "y"
1	20.21	121.62	21	71.60	157.49
2	22.67	124.05	22	73.53	158.94
3	25.43	126.22	23	76.59	159.57
4	28.06	128.48	24	78.83	160.07
5	30.30	130.41	25	81.29	162.40
6	33.43	132.40	26	83.84	163.18
7	36.27	132.09	27	86.76	164.13
8	38.61	136.51	28	89.24	165.38
9	40.96	139.28	29	91.84	166.13
10	43.51	141.33	30	94.41	166.78
11	45.97	142.47	31	96.90	167.60
12	48.38	144.69	32	100.02	167.79
13	50.86	146.23	33	102.48	168.54
14	53.37	149.39	34	104.76	168.47
15	55.88	149.28	35	107.51	169.00
16	59.02	151.09	36	110.18	170.44
17	61.44	152.26	37	113.01	170.71
18	63.72	153.65	38	114.95	170.87
19	66.48	155.32	39	117.82	170.97
20	68.89	156.36	40	120.64	169.92

Tableau 4 (suite...)

Images	Coordonnées "x"	Coordonnées "y"	Images	Coordonnées "x"	Coordonnées "y"
41	123.66	170.98	61	177.32	159.18
42	124.94	169.66	62	179.83	157.41
43	128.84	171.17	63	182.66	156.17
44	131.03	169.49	64	185.23	154.80
45	133.56	170.29	65	188.62	153.21
46	136.93	170.05	66	191.50	151.44
47	139.38	169.55	67	185.75	137.67
48	141.81	169.15	68	196.20	146.27
49	143.42	167.15	69	197.98	146.92
50	147.25	169.04	70	202.29	145.47
51	149.68	168.42	71	204.96	143.84
52	153.26	167.53	72	207.94	141.96
53	155.01	166.45	73	210.86	139.76
54	156.45	164.06	74	212.72	137.05
55	160.94	165.01	75	215.41	135.00
56	163.18	164.26	76	218.77	133.54
57	166.09	163.43	77	221.68	130.89
58	169.07	169.36	78	224.86	129.27
59	171.73	161.30	79	227.47	126.82
60	174.30	159.91	80	230.58	124.39
			81	233.10	121.36

Tableau 5

Coordonnées x et y du centroïde optique obtenues par le vidéo automatique
lors de l'analyse de la trajectoire du ballon (série 2).

Images	Coordonnées "x"	Coordonnées "y"	Images	Coordonnées "x"	Coordonnées "y"
1	25.47	121.46	21	76.74	158.52
2	29.01	123.37	22	79.28	159.72
3	30.88	126.07	23	81.88	160.61
4	33.12	128.40	24	84.65	162.09
5	36.52	130.29	25	87.28	162.91
6	39.22	132.34	26	89.56	163.90
7	41.20	135.67	27	92.64	164.36
8	43.93	137.03	28	95.18	165.75
9	46.62	138.8	29	97.55	166.46
10	48.82	141.29	30	100.21	167.86
11	51.48	142.50	31	102.99	168.25
12	53.74	144.8	32	105.27	168.69
13	56.68	146.61	33	108.89	167.54
14	59.17	148.14	34	110.88	170.03
15	61.27	149.50	35	123.29	170.55
16	64.13	151.44	36	115.84	170.71
17	66.63	152.81	37	118.66	171.05
18	69.27	154.55	38	121.17	171.42
19	72.08	155.74	39	123.70	171.49
20	74.82	157.12	40	126.58	171.28

Tableau 5 (suite...)

Images	Coordonnées "x"	Coordonnées "y"	Images	Coordonnées "x"	Coordonnées "y"
41	128.88	172.02	61	183.71	159.48
42	131.72	171.95	62	186.17	158.47
43	134.63	170.85	63	189.06	157.11
44	137.33	171.33	64	192.20	156.18
45	139.96	171.13	65	194.90	154.20
46	142.83	170.83	66	197.76	153.01
47	145.04	170.66	67	195.69	147.97
48	148.19	170.21	68	203.17	149.81
49	150.74	169.30	69	205.70	146.09
50	153.39	169.36	70	208.55	146.09
51	156.62	169	71	211.67	144.18
52	158.97	168.23	72	214.72	142.66
53	161.85	167.69	73	217.74	140.48
54	164.33	166.38	74	220.52	138.78
55	167.11	165.55	75	223.22	135.87
56	169.75	164.43	76	225.96	134.10
57	172.55	164.08	77	227.31	130.66
58	174.91	162.72	78	232.18	129.64
59	178.08	162	79	234.55	127
60	180.70	160.74	80	237.63	124.39
			81	240.15	121.99

Tableau 6

Coordonnées x et y du centroïde optique obtenues par le vidéo manuel
lors de l'analyse de la trajectoire du ballon

Images	Coordonnées "x"	Coordonnées "y"	Images	Coordonnées "x"	Coordonnées "y"
1	19	121	21	66	155
2	22	123	22	71	158
3	24	126	23	73	159
4	27	128	24	76	160
5	29	130	25	79	161
6	32	132	26	81	162
7	34	135	27	84	163
8	37	136	28	85	163
9	39	138	29	88	164
10	42	140	30	91	164
11	44	141	31	93	166
12	47	144	32	96	166
13	49	145	33	99	167
14	52	147	34	101	167
15	54	148	35	104	168
16	56	150	36	106	168
17	58	151	37	109	168
18	60	153	38	111	168
19	63	154	39	114	168
20	66	155	40	116	168

Tableau 6 (suite...)

Images	Coordonnées "x"	Coordonnées "y"	Images	Coordonnées "x"	Coordonnées "y"
41	119	169	61	170	157
42	121	168	62	175	155
43	123	168	63	178	154
44	126	168	64	180	153
45	129	168	65	184	152
46	132	168	66	187	150
47	135	168	67	189	148
48	137	167	68	192	146
49	140	167	69	195	144
50	143	166	70	196	142
51	145	166	71	201	141
52	148	165	72	203	139
53	151	165	73	206	137
54	154	163	74	210	135
55	156	163	75	212	133
56	159	162	76	215	131
57	161	161	77	218	128
58	163	160	78	221	126
59	167	159	79	224	124
60	170	158	80	227	121
			81	230	119

Tableau 7

Coordonnées x et y obtenues par équations mathématiques et utilisant
le paramètre "g" fixé à 32.176 pieds/s²

Images	Coordonnées "x"	Coordonnées "y"	Images	Coordonnées "x"	Coordonnées "y"
1	23.80	118.81	21	77.18	157.09
2	26.47	121.30	22	79.85	158.36
3	29.13	123.73	23	82.52	159.57
4	31.80	126.10	24	85.19	160.73
5	34.47	128.41	25	87.86	161.82
6	37.14	130.66	26	90.53	162.85
7	39.81	132.84	27	93.20	163.82
8	42.48	134.97	28	95.87	164.73
9	45.15	137.04	29	98.53	165.58
10	47.82	139.04	30	101.20	166.37
11	50.49	140.99	31	103.87	167.10
12	53.16	142.87	32	106.54	167.76
13	55.83	144.69	33	109.21	168.37
14	58.50	146.46	34	111.88	168.92
15	61.17	148.16	35	114.55	169.40
16	63.83	149.80	36	117.22	169.82
17	66.50	151.38	37	119.89	170.19
18	69.17	152.89	38	122.56	170.49
19	71.84	154.35	39	125.23	170.73
20	74.51	155.75	40	127.90	170.91

Tableau 7 (suite...)

Images	Coordonnées "x"	Coordonnées "y"	Images	Coordonnées "x"	Coordonnées "y"
41	130.56	171.03	61	183.95	160.63
42	133.23	171.08	62	186.62	159.47
43	135.90	171.08	63	189.29	158.25
44	138.57	171.02	64	191.96	156.97
45	141.24	170.89	65	194.63	155.63
46	143.91	170.71	66	197.30	154.23
47	146.58	170.46	67	199.96	152.76
48	149.25	170.16	68	202.63	151.24
49	151.92	169.79	69	205.30	149.65
50	154.59	169.36	70	207.97	148.01
51	157.26	168.87	71	210.64	146.30
52	159.93	168.32	72	213.31	144.53
53	162.60	167.71	73	215.98	142.71
54	165.26	167.04	74	218.65	140.82
55	167.93	166.30	75	221.32	138.87
56	170.60	165.51	76	223.99	136.86
57	173.27	164.65	77	226.66	134.79
58	175.94	163.74	78	229.33	132.65
59	178.61	162.76	79	323.00	130.46
60	181.28	161.73	80	234.66	128.21
			81	237.33	125.89

Tableau 8

Coordonnées x et y du centroïde optique obtenues par le vidéo automatique
lors de l'analyse du saut en longueur (série 1)

Images	Coordonnées "x"	Coordonnées "y"	Images	Coordonnées "x"	Coordonnées "y"
1	61.90	91.70	21	63.61	82.03
2	59.54	93.77	22	64.36	82.25
3	60.57	92.92	23	65.24	81.66
4	60.81	92.85	24	64.52	81.42
5	60.85	92.40	25	64.00	82.08
6	60.82	90.37	26	64.97	82.34
7	60.92	89.00	27	66.36	81.90
8	61.39	89.54	28	65.84	82.99
9	61.75	87.14	29	67.15	83.29
10	61.49	87.05	30	66.87	83.83
11	61.49	86.58	31	67.65	83.00
12	61.61	85.77	32	67.39	82.42
13	61.70	84.49	33	68.22	82.14
14	61.45	85.24	34	68.38	83.43
15	62.18	85.01	35	70.35	82.97
16	62.80	83.36	36	70.37	83.28
17	63.27	83.33	37	69.75	84.38
18	63.82	83.01	38	70.13	84.36
19	63.88	83.01	39	70.50	86.12
20	64.11	81.70	40	72.24	85.38

Images	Coordonnées "x"	Coordonnées "y"	Images	Coordonnées "x"	Coordonnées "y"
41	72.01	85.38	63	95.74	101.23
42	72.52	85.56	64	97.99	102.68
43	73.16	87.13	65	96.50	103.85
44	73.18	86.92	66	98.52	104.45
45	74.38	88.08	67	101.39	106.87
46	75.55	89.36	68	102.23	108.58
47	75.52	88.10	69	104.51	112.91
48	76.73	88.89	70	105.42	112.86
49	78.97	89.58	71	105.90	115
50	79.81	89.88	72	110.38	120.15
51	80.91	90.88	73	11.04	120.60
52	81.90	91.14	74	112.97	120.83
53	83.68	91.96	75	114.12	124.33
54	83.85	92.95	76	115.80	124.66
55	85.35	94.24	77	116.70	125.40
56	84.73	94.65	78	117.55	125.17
57	86.48	94.37	79	119.43	124.60
58	87.49	95.98	80	120.84	123.73
59	87.85	94.96	81	122.75	124.86
60	91.16	97.76	82	122.88	123.60
61	90.26	96.94	83	124.54	123.58
62	93.02	99.64	84	125.58	124.11

Tableau 8 (suite...)

Images	Coordonnées "x"	Coordonnées "y"	Images	Coordonnées "x"	Coordonnées "y"
85	127.21	124.19	108	163.36	106.25
86	128.67	121.96	109	167.97	105.04
87	131.06	121.66	110	167.57	103.42
88	132.89	118.76	111	168.78	101.13
89	132.50	117.57	112	170.00	99.54
90	136.70	120.40	113	172.36	97.76
91	136.33	120.88	114	173.34	89.98
92	139.91	120.56	115	176.98	93.43
93	140.60	121.08	116	179.12	92.74
94	140.34	119.42	117	179.72	90.63
95	142.65	116.96	118	180.00	87.90
96	142.97	118.49	119	180.11	85.29
97	146.64	118.33	120	182.74	84.15
98	147.53	118.47	121	184.25	82.74
99	148.26	114.05	122	186.93	83.06
100	150.06	117.03	123	187.36	81.82
101	153.52	116.69	124	186.82	80.49
102	154.07	113.25	125	189.02	78.55
103	156.43	112.09	126	190.61	76.80
104	157.99	110.14	127	192.26	76.09
105	159.71	109.97	128	194.84	76.15
106	161.60	108.21	129	194.88	74.98
107	164.24	108.46	130	195.64	73.58

Tableau 9

Coordonnées x et y du centroïde optique obtenues par le vidéo automatique
lors de l'analyse du saut en longueur (série 2)

Images	Coordonnées "x"	Coordonnées "y"	Images	Coordonnées "x"	Coordonnées "y"
1	61.06	90.87	21	60.85	84.13
2	57.68	93.43	22	60.75	83.61
3	57.26	92.70	23	60.99	83.51
4	59.08	92.28	24	61.51	83.31
5	57.28	92.44	25	61.20	83.22
6	57.51	92.10	26	62.15	83.81
7	57.52	91.68	27	62.67	83.37
8	58.69	91.04	28	62.44	83.09
9	58.39	91.21	29	63.22	83.21
10	59.07	89.51	30	63.39	83.68
11	59.26	89.89	31	63.72	83.33
12	59.08	90.06	32	64.08	84.14
13	59.78	88.40	33	64.74	83.16
14	59.15	87.60	34	64.75	83.32
15	59.44	87.24	35	65.66	84.15
16	59.84	86.88	36	66.46	85.52
17	59.61	86.01	37	66.92	85.63
18	60.13	85.77	38	65.91	84.63
19	60.36	84.97	39	66.80	85.99
20	60.89	84.31	40	67.26	84.65

Images	Coordonnées "x"	Coordonnées "y"	Images	Coordonnées "x"	Coordonnées "y"
41	67.86	87.16	63	89.21	102.46
42	68.56	88.34	64	90.11	103.35
43	69.08	86.62	65	91.33	105.00
44	70.19	87.94	66	92.64	106.02
45	70.27	87.57	67	93.98	107.19
46	71.50	89.05	68	96.64	109.86
47	72.02	88.82	69	98.02	111.75
48	72.55	90.11	70	100.35	113.41
49	73.92	89.96	71	101.53	115.82
50	75.18	91.59	72	103.95	117.89
51	75.64	91.43	73	105.53	120.48
52	77.09	93.70	74	107.72	120.86
53	77.16	92.63	75	108.66	122.33
54	78.67	94.39	76	110.40	124.46
55	80.18	94.30	77	111.79	124.04
56	80.13	95.13	78	113.26	124.27
57	80.59	95.31	79	114.51	125.36
58	82.59	96.64	80	115.34	124.60
59	83.96	98.05	81	117.42	125.82
60	84.98	99.43	82	119.20	125.86
61	86.30	99.79	83	120.86	126.57
62	87.90	101.92	84	122.36	126.41

Images	Coordonnées "x"	Coordonnées "y"	Images	Coordonnées "x"	Coordonnées "y"
85	123.34	124.55	108	162.75	111.28
86	124.66	123.97	109	164.39	110.39
87	125.93	123.96	110	168.27	109.20
88	127.58	123.68	111	168.96	106.39
89	128.98	124.19	112	170.66	105.21
90	131.26	123.87	113	172.70	103.47
91	132.54	124.01	114	173.59	102.66
92	133.66	123.04	115	175.61	100.49
93	135.51	122.35	116	177.47	94.45
94	137.66	123.00	117	178.99	95.99
95	139.60	122.63	118	181.27	93.42
96	140.71	122.22	119	181.76	90.76
97	142.19	120.65	120	183.33	88.80
98	144.59	121.71	121	184.30	87.17
99	146.53	121.85	122	185.48	86.07
100	148.43	121.28	123	186.65	84.65
101	150.80	120.66	124	188.75	84.21
102	152.49	119.15	125	189.79	82.67
103	154.82	117.35	126	191.06	81.87
104	155.71	116.30	127	192.09	80.28
105	157.63	114.49	128	195.20	78.10
106	158.81	112.40	129	194.98	77.85
107	161.64	112.12	130	196.25	76.21

Coordonnées x et y du centre de gravité obtenu par le GRADICON.

Ces coordonnées sont ramenées à l'échelle vidéo.

Images	Coordonnées "x"	Coordonnées "y"	Images	Coordonnées "x"	Coordonnées "y"
1	61.79	03.14	21	61.93	84.18
2	61.21	92.42	22	62.15	84.04
3	61.35	92.20	23	62.15	83.39
4	61.64	91.41	24	62.00	83.60
5	61.35	90.83	25	62.51	82.66
6	61.71	90.54	26	61.93	82.66
7	60.99	89.74	27	62.36	82.16
8	61.35	89.38	28	62.36	82.59
9	61.71	88.88	29	61.71	83.17
10	61.43	88.66	30	62.15	82.59
11	61.79	87.94	31	62.22	82.52
12	61.79	87.89	32	62.22	82.52
13	61.71	87.00	33	62.36	82.59
14	61.93	86.93	34	62.51	82.66
15	61.86	86.06	35	63.09	83.82
16	62.08	85.92	36	63.95	83.82
17	62.22	85.92	37	64.10	84.11
18	62.08	85.19	38	64.60	83.68
19	62.08	84.76	39	65.11	83.75
20	61.71	84.18	40	65.40	84.69

Images	Coordonnées "x"	Coordonnées "y"	Images	Coordonnées "x"	Coordonnées "y"
41	65.69	84.54	64	90.32	101.67
42	67.71	85.55	65	91.55	102.03
43	68.43	85.92	66	93.50	103.98
44	69.37	86.49	67	94.95	105.28
45	69.81	86.35	68	96.25	106.43
46	71.03	87.43	69	98.20	107.01
47	71.61	87.87	70	99.21	109.03
48	72.33	87.87	71	102.03	110.55
49	73.06	88.44	72	103.54	111.92
50	73.64	89.09	73	104.20	112.57
51	75.30	89.46	74	105.21	113.95
52	75.51	89.74	75	107.66	114.52
53	76.09	90.54	76	108.89	116.19
54	77.39	91.26	77	110.41	116.33
55	77.97	92.06	78	112.29	118.35
56	79.56	92.63	79	114.74	119.09
57	80.79	93.57	80	115.90	117.92
58	81.65	95.45	81	116.40	117.85
59	82.88	95.52	82	119.73	118.64
60	84.62	96.68	83	121.32	119.22
61	85.48	97.84	84	122.40	119.22
62	87.51	98.92	85	125.94	119.29
63	88.52	100.15	86	127.02	119.65

Tableau 10 (suite...)

Images	Coordonnées "x"	Coordonnées "y"	Images	Coordonnées "x"	Coordonnées "y"
87	128.83	119.65	109	160.76	100.94
88	130.28	119.73	110	162.28	99.06
89	131.72	170.30	111	163.29	97.69
90	133.24	119.58	112	165.32	96.46
91	134.39	119.00	113	166.98	94.80
92	136.13	118.79	114	167.99	93.72
93	137.28	117.63	115	168.93	92.56
94	139.02	117.70	116	170.59	90.54
95	140.32	117.05	117	172.25	88.66
96	142.12	116.98	118	173.48	86.28
97	143.14	115.46	119	175.29	84.62
98	144.58	114.74	120	176.95	82.09
99	145.66	114.09	121	178.59	80.21
100	148.41	112.36	122	179.62	80.21
101	149.93	110.98	123	180.99	78.11
102	151.30	110.26	124	181.79	77.82
103	152.38	108.82	125	183.45	75.01
104	154.19	107.44	126	183.52	74.28
105	155.13	106.29	127	184.53	73.49
106	156.43	104.70	128	185.40	73.13
107	158.09	103.47	129	186.70	72.26
108	159.17	102.97	130	187.57	70.74

ANNEXE B

ESTIMATION DES PARAMETRES

POUR LES EQUATIONS DE TRAJECTOIRE

Formules de base servant à l'estimation des paramètres des équations de trajectoire (nous ignorons, l'effet de la résistance de l'air).

$$\hat{X}_t = (V_O \cos \theta)t + (X_O) \quad (1)$$

$$\hat{Y}_t = (V_O \sin \theta)t + (\tfrac{1}{2} g)t^2 + (Y_O) \quad (2)$$

L'équation 1 en est une du premier degré, tandis que l'équation 2 en est une du deuxième degré à cause du paramètre de gravitation. Paramètres estimés pour la série 1 d'amplitude égale à 211.603 unités machine (UM) et d'une durée totale de .791 sec.

$$(V_O \cos \theta) = 267.443 \text{ UM}$$

$$(X_O) = 18.597 \text{ UM}$$

$$(V_O \sin \theta) = 249.496 \text{ UM}$$

$$(\tfrac{1}{2} g) = -314.360 \text{ UM/sec}^2$$

$$(Y_O) = 120.9557 \text{ UM}$$

Evaluation de θ et V_O

$$V_O = \sqrt{(V_O \cos \theta)^2 + (V_O \sin \theta)^2} = 365.751 \text{ UM/sec}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{(V_O \sin \theta)}{(V_O \cos \theta)} \right] = 43.01 \text{ degrés}$$

Paramètres estimés pour la série 2 d'amplitude égale à 213.537 unités machine (UM) et d'une durée totale de 0.791 sec.

$$(V_O \cos \theta) = 269.887 \text{ UM}$$

$$(X_O) = 23.801 \text{ UM}$$

$$(V_O \sin \theta) = 253.940 \text{ UM}$$

$$(\frac{1}{2} g) = -318.519 \text{ UM/sec}^2$$

$$(Y_O) = 120.862 \text{ UM}$$

Evaluation de θ et V_O

$$V_O = \sqrt{(V_O \cos \theta)^2 + (V_O \sin \theta)^2} = 370.573 \text{ UM/sec}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{(V_O \sin \theta)}{(V_O \cos \theta)} \right] = 43.26 \text{ degrés}$$

Reconstitution de la valeur "g" à partir des paramètres estimés depuis les deux séries vidéo automatiques.

$$\text{selon } Y_t = V_O \sin \theta t - \frac{1}{2} g t^2 + Y_O$$

$$\text{où } \frac{1}{2} g = \left[\frac{S_Y}{S_t^2} * \frac{r_{Yt}^2 - r_{Yt} r_{tt}^2}{1 - r_{tt}^2} \right]$$

$$\text{"g" série 1 } \frac{1}{2} g = -314.36 \text{ UM/sec}^2$$

$$\text{"g" série 2 } \frac{1}{2} g = -318.52 \text{ UM/sec}^2$$

L'évaluation de l'échelle faite en début de digitalisation montre une valeur de 58 unités machine \sim 3 pieds (.914 m), d'où:

$$g_1 = -32.52 \text{ pi./sec}^2 \quad (9.91 \text{ m/sec}^2)$$

$$g_2 = -32.95 \text{ pi./sec}^2 \quad (10.04 \text{ m/sec}^2)$$

L'erreur relative $g_1/g_2 = 1.31\%$

ANNEXE C

LES HISTOGRAMMES

DE DISTANCES CARTESIENNES

Figure 3

69

Histogramme des distances cartésiennes entre
les coordonnées provenant du vidéo automatique et
les coordonnées obtenues par équations mathématiques (ballon).

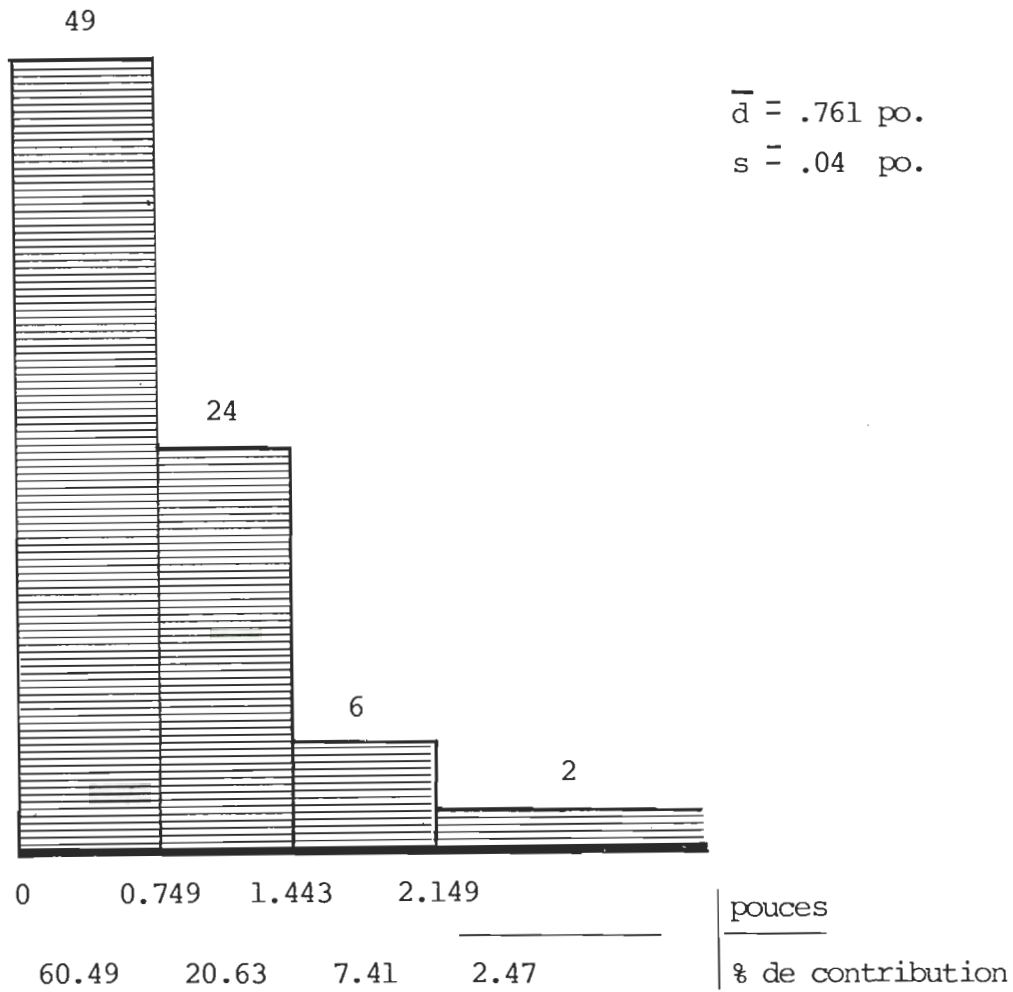
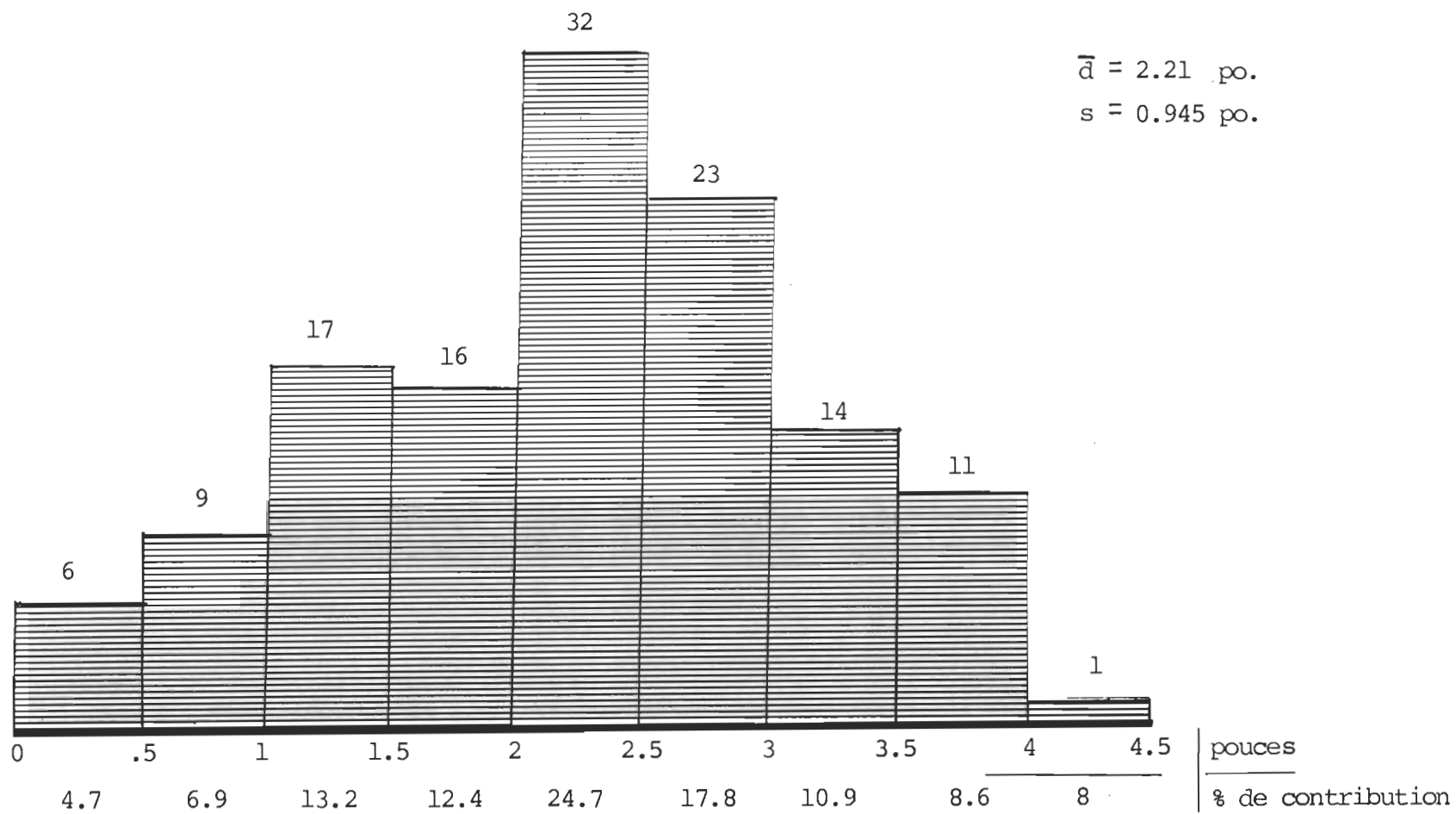


Figure 4

Histogramme des distances cartésiennes entre
vidéo automatique et GRADICON (saut)



ANNEXE D

COMPORTEMENT DES ERREURS DE GRILLE

Figure 5

Représentation d'une grille de 9 par 9 dont le point central X est le point "idéal".

1	F	C8	C7	C6	T	C6	C7	C8	F
2	C8	F	C5	C4	T	C4	C5	F	C8
3	C7	C5	F	C3	T	C3	F	C5	C7
4	C6	C4	C3	F	T	F	C3	C4	C6
5	T	T	T	T	X	T	T	T	T
6	C6	C4	C3	F	T	F	C3	C4	C6
7	C7	C5	F	C3	T	C3	F	C5	C7
8	C8	F	C5	C4	T	C4	C5	F	C8
9	F	C8	C7	C6	T	C6	C7	C8	F
	A	B	C	D	E	F	G	H	I

Les erreurs d'unités de grille peuvent se produire de la façon démontrée plus loin. Pour la démonstration nous utilisons une grille 9 par 9 (figure 4) dont la cellule centrale est le point "idéal". On imagine une configuration en échiquier où les erreurs se comportent comme les pièces du jeu. C'est-à-dire, des déplacements latéraux et longitudinaux comme une tour, diagonaux comme un fou ou en crochet comme un cavalier. L'indice rattaché au cavalier représente un ordre de distance le séparant du point "idéal" (E5). Par exemple une erreur de trois unités de grille peut se comporter comme une tour (B5,E2,H5,E8), comme un fou (B8,B2,H2,H8) et comme un cavalier (B4,B3,C2,D2,F2,G2,H3,

H4, H6, G8, C8, B7, B6). La moyenne de ces distances est de 3.463 unités de grille (voir le tableau 11 ci-bas).

Tableau 11

Distances cartésiennes moyennes causées par des
erreurs de "x" unités de grille

1 unité			2 unités			3 unités			4 unités		
Type	Dist.	Fréq.	Type	Dist.	Fréq.	Type	Dist.	Fréq.	Type	Dist.	Fréq.
T	1	4	T	2	4	T	3	4	T	4	4
F	1.414	4	C ₃	2.236	8	C ₄	3.162	8	C ₆	4.123	8
$\bar{D} =$	1.207		F	2.828	4	C ₅	3.605	8	C ₇	5	8
			$\bar{D} =$	2.325		F	4.242	4	C ₈	5.656	8
						$\bar{D} =$	3.463		F	4.606	4
									$\bar{D} =$	4.606	

ANNEXE E

LEXIQUE STATISTIQUE

Lexique statistique

RMS

(Root Mean Square). La racine carrée du complément du coefficient de corrélation (r) de deux séries multipliée par la somme des variances des deux séries. Indice de superposition de deux séries. Un RMS de 0 signifie une coordonnance parfaite des séries.

r

Coefficient de corrélation de Pearson. Indice permettant de quantifier le rapprochement de deux séries de données. $r_{1,2}$ identifie les séries corrélées. Une corrélation de +1 indique un rapprochement parfait.

k

Coefficient d'aliénation. Racine carrée du complément de $r_{1,2}^2$. Indice permettant de quantifier le manque d'association entre les séries.

PDE

Pourcentage de différence d'erreurs dans un étalement de -100% à +100% permettant de faciliter la compréhension du rendement comparé du vidéo automatique. Une valeur de PDE positive montre un avantage proportionnel du vidéo automatique, une valeur nulle indique l'égalité de la comparaison.

ER

Erreur relative. 100 fois le RMS divisé par la racine carrée de la moyenne géométrique des amplitudes. Proportion du RMS par rapport à l'amplitude du déplacement.